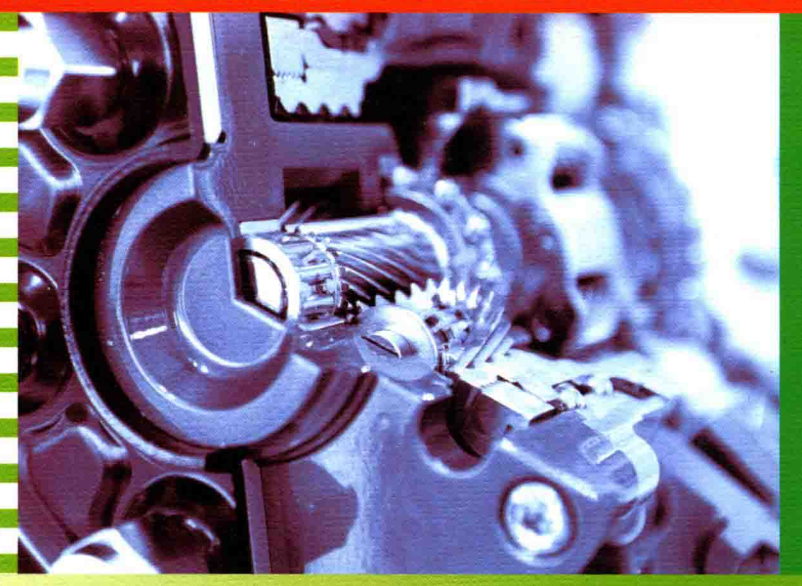
普通高等教育机械工程类“十二五”规划教材

机械制造工艺学

JIXIEZHIZAOGONGYIXUE



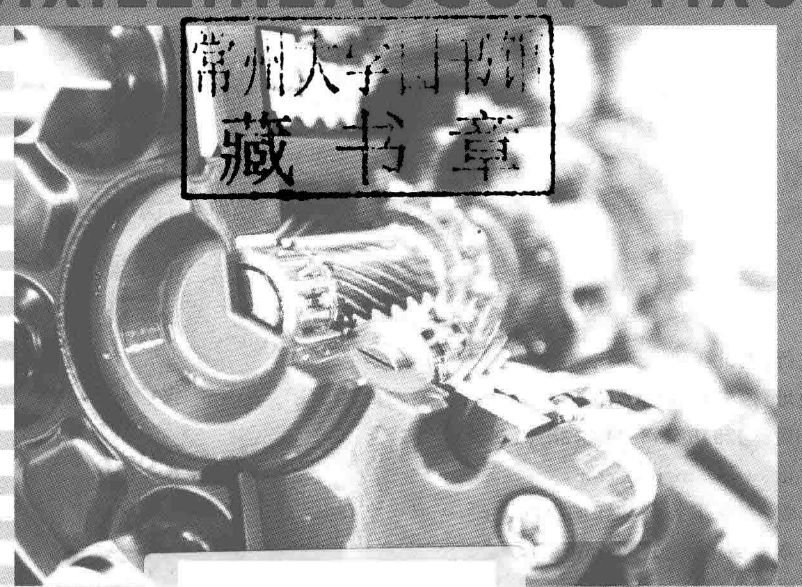
主编 于 泓 熊 江 朱鹏超 卢金平

西北工业大学出版社
全国985、211大学出版社

普通高等教育机械工程类“十二五”规划教材

机械制造工艺学

JIXIEZHIZAOGONGYIXUE



主　编　朱鹏超　卢金平
副主编　张孝琼

西北工业大学出版社
全国985、211大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械制造工艺学/于泓，熊江，朱鹏超，卢金平主编．—西安：西北工业大学出版社，2015.1

ISBN 978-7-5612-4271-1

Ⅰ.①机… Ⅱ.①于… ②熊… ③朱… ④卢… Ⅲ.①机械制造工艺 Ⅳ.①TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第014032号

出版发行：西北工业大学出版社
通信地址：西安市友谊西路127号　　邮编：710072
电　　话：(029)88493844　88491757
网　　址：www.nwpup.com
印 刷 者：北京平谷俊林印刷有限公司
开　　本：787mm×1 092mm　1/16
印　　张：20.25
字　　数：491千字
版　　次：2015年1月第1版　　2015年1月第1次印刷
定　　价：39.50元

前　言

本书是根据高等院校高素质高级技能型专门人才培养目标的要求，从生产实际要求出发，结合培养应用型工程技术人才的教学特色，在总结各院校的教学教改最新成果的基础上，由具有丰富教学经验的教师编写而成的。

本书根据企业的工作岗位和典型工作任务，开发设计了以工作过程为导向，工学结合的课程体系，注重理论知识与生产实践相结合，重点放在基础知识和基本技能，加强对学生机械制造工艺过程实践与应用综合能力的培养，对各部分教学内容进行了适当的整合和精炼，引导学生学以致用。本书以典型工作任务为引领，以典型零件工艺规程编制为主线，以相关知识为支撑的思路，突出实际应用能力的培养。每一单元都由工作任务引入，进而学习解决问题的相关知识和技能，再以任务实施检查学习和应用的成效，最后通过拓展项目进行巩固和提高，以利于帮助学生掌握知识、巩固所学、提高解决工程问题的能力。

本书介绍了与机械制造工艺相关的主要内容，全书共分八个项目，由绪论、机械加工工艺规程设计、轴类零件加工工艺、套类零件加工工艺、箱体类零件加工工艺、齿轮类零件加工工艺、机械装配工艺和先进制造技术等部分组成。

全书由于泓、熊江、朱鹏超、卢金平任主编并负责编写书中项目一、项目三、项目四、项目六和项目八，由王艳莉、张东凤、张孝琼任副主编并负责编写书中项目二、项目五和项目七。最后全书由于泓统稿及修改。

在本书的编写过程中得到了有关专家、学者的大力支持，编者在此表示诚挚的感谢。同时，本书中参考并引用了有关文献资料、插图等，也在此对上述作者深表谢意。

由于编者水平有限，书中难免存在不当和错误之处，恳请广大读者批评指正。

编　者

2015 年 1 月

目录 Contents

项目一　绪　论

1. 机械制造业的现状与发展

(1) 机械制造业在国民经济中的地位与作用

机械制造业是指从事各种动力机械、起重运输机械、农业机械、冶金矿山机械、化工机械、纺织机械、机床、工具、仪器、仪表及其他机械设备等生产的行业。机械制造业是制造业最主要的组成之一，担负着向其他部门提供各种工具、仪器和机械设备的任务，国民经济各部门的生产水平和经济效益在很大程度上取决于机械制造业所提供的装备的技术性能、质量和可靠性，因此，从一定意义上讲，机械制造业的技术水平和发展速度决定着整个国民经济的发展。

机械制造业作为国民经济的基础产业和重要支柱，其发展水平和规模是衡量一个国家工业化水平和经济实力的重要标志之一。纵观世界各国，任何一个经济强大的国家无不具有强大的机械制造业。据西方工业国家统计，机械制造业创造了60%的社会财富，完成了45%的国民经济收入。因此，经济的竞争归根到底就是机械制造业的竞争，当前经济发达国家纷纷把机械制造业和机械制造技术列为国家的高新关键技术和优先发展项目，并给予强有力的支持，以确立制造业在国民经济中的主导作用。

(2) 机械制造业的现状和发展趋势

制造业的发展历史悠久，与人类文明的发展密切相关。早在石器时代，人们就懂得利用天然石料制作劳动工具；到了青铜器和铁器时代，为了满足农耕经济的需要，人们开始采矿、冶炼，用以铸锻工具，并制作纺织机、水利机、车辆等机械产品。此时，采用的是以手工劳动为主的作坊式的生产方式。

18世纪60年代起，随着蒸汽机作为动力机被广泛使用，标志着第一次工业革命（又称产业革命）的开始，生产方式由工厂代替了手工作坊，用机器代替了手工劳动，逐渐形成现代意义上的机械制造业。

到了19世纪70年代，电磁场理论的建立为发电机和电动机的产生奠定了基础，电力被广泛应用，标志第二次工业革命的开始。科学技术迅猛发展，各种新技术、新发明层出不穷，并被迅速应用于工业生产，大大促进了经济的发展。

20世纪四五十年代以来，在原子能、电子计算机、微电子技术、空间技术和生物工程等领域取得的重大突破，标志着第三次技术革命的到来。进入21世纪，机械制造技术向自动化、柔性化、集成化、智能化、信息化、精密化和清洁化等方向发展。目前，发达国家的机械制造技术已经达到相当高的水平，产品设计普遍采用计算机辅助设计（CAD）、有限元分析、逆向工程等手段；机械加工广泛采用特种加工、精密与超精密加工、超高速加工等技术；机械制造系统实现了自动化，CAD/CAPP/CAM一体化技术、柔性制造系统、计算机

集成制造系统、虚拟制造等新的制造理念投入生产应用；企业管理更加科学、规范，广泛实行了企业资源计划、精益生产、敏捷制造、并行工程等现代生产经营管理的方法和手段。

我国近代工业兴起于洋务运动，但是长期以来，由于封建主义的压迫和帝国主义的侵略，我国的机械制造工业的发展一直处于停滞状态。新中国成立以来，我国机械制造业克服了起步晚、底子薄，受到其他国家的技术封锁等困难，取得了长足的进步和发展，建立了自己独立的、具有加大规模的、门类齐全的工业体系，取得了举世瞩目的成就。2010 年中国工业总产值首次超过了美国，成为世界第一制造大国，“中国制造”的影响力在世界范围内扩展。据统计，目前在全球所有工业产品中，我国制造的无论是机床、汽车，还是冰箱、彩电等家电产品，许多机电产品的产量早已跃居世界第一；小到玩具、鞋袜，大到飞机、轮船，中国制造的身影无处不在；超级计算机、正负电子对撞机、载人宇宙飞船、载人空间站、超深载人潜水器等先进设备，表明了我国的科学技术水平已经达到了世界先进水平。

然而，我们应该清醒地看到，以机械、汽车等为代表的机械制造业作为国民经济的支柱产业，虽然为推动中国制造走向世界、促进社会经济发展起到了示范和领跑作用，但中国仍然是机械制造大国而不是机械制造强国。与工业发达国家相比，我国的机械制造业还存在很大的差距。主要表现在产品质量和技术水平不高，缺乏自主知识产权的产品；制造技术和工艺装备落后，技术创新能力不足；企业专业化生产管理水平低下，劳动生产率低，市场竞争力不强。因此，我国的机械制造业与国际先进水平还有一定的差距，必须不断地开拓进取，培养高水平的人才和提高现有人员的素质，学习和掌握当代最先进的科学技术，增强自主创新能力，提高工艺技术和生产管理水平，才能把我国的机械制造业做大做强。

2. 机械制造系统和机械加工工艺系统

从系统的观点来看，一个典型的机械制造企业通常是由不同大小、规模和复杂程度的三个层次的系统组成的，即机械制造系统、机械加工工艺系统和企业生产系统。

（1）机械制造系统

企业生产系统是将生产要素转变成生产财富并创造效益的输入输出系统。制造是指生产过程中从原材料到成品阶段直接起作用的那部分工作内容，包括产品设计、工艺设计、零件加工、检验、装配调试、包装入库等具体操作。从广义上讲，制造就是生产。

长期以来，人们对于机械制造中所用的机床、工具和制造过程，往往都是分别地、单个地加以研究。但是，机械制造的各个组成部分实质上是一个有机的整体，需要以控制论和系统工程学为工具，用系统的观点进行分析和研究，这样才能对机械制造过程实行最有效的控制，并大幅度地提高加工质量和加工效率。

机械制造系统是一个输入一定的材料或毛坯，输出加工后的零件、部件或产品的系统。机械制造系统包括物质子系统、信息子系统和能量子系统等 3 个子系统。从某种意义上讲，机械制造系统又是企业生产系统的组成部分或子系统。

物质子系统把毛坯、刀具、夹具、量具及其他辅助物料作为原材料输入，经过存储、运输、加工、检验等环节最后以成品输出。这个流程是物质的流动，故称之为物质流。信息子系统负责处理加工任务、加工顺序、加工方法及物质流所要确定的作业计划、调度和管理指令等信息。这个流程属于信息范畴，称之为信息流。能量子系统包括制造过程中的能量转换、消耗。这个流程称之为能量流。

机械制造系统既可以是一台单独的加工设备，如各种机床、机电设备，也可以是包括多

台加工设备、工具和辅助系统的工段或制造单元。

在传统的制造系统中，物质子系统和能量子系统都会存在，但信息子系统则往往缺乏。例如，在由一台普通车床构成的制造系统中，只有物质系统和能量系统，加工信息的输入与传递是由人工完成的。而在现代制造系统中，则较普遍增加了信息系统，如数控机床中的CNC就是典型的信息系统，通过其内部的计算机，可以存放并处理零件的加工信息，控制加工过程。

（2）机械加工工艺系统

制造工艺是在原材料转化为产品的过程中所施行的各种手段的总称。这些手段包括运用一定的知识、技能，操纵可以利用的设备、工具，采取各种有效的方法等。制造工艺涉及生产活动的各个方面和生产的全过程，也可以被认为是一个从产品概念到最终产品的集成活动，是一个功能体系和信息处理系统。

机械加工工艺流程是工件或者零件制造加工的步骤，是采用机械加工的方法，直接改变毛坯的形状、尺寸和表面质量等，使其成为零件的全过程。例如，一个普通零件的加工工艺流程是毛坯→粗加工→热处理→精加工→检验→入库。

机械加工工艺就是在加工流程的基础上，对工件或者零件制造加工过程中，用以改变其形状、尺寸、相对位置和性质等，使之成为成品或半成品的每个步骤的详细说明。例如，对于上面所述的流程，在机械加工工艺中应对诸如毛坯如何制造，热处理工序如何安排，热处理硬度要求多少，粗加工、精加工要分多少工序和工步，分别用什么样的机床、刀具和夹具，切削用量是多少，零件的加工精度和表面粗糙度要达到多少等问题作出详细而具体的规定和说明。

技术人员根据企业生产条件和零件数量，确定采用的工艺过程，并按照规定的形式书写成工艺文件，这种文件就称为工艺规程。

总的来说，工艺流程是纲领，加工工艺是每个步骤的详细参数，工艺规程是企业根据实际情况编写的特定的加工工艺。

机械加工工艺系统是制造企业中处于最基层的一个加工单元，往往由机床、刀具、夹具和工件等4个要素组成，如车床加工系统就是由车床、车刀、夹具和工件等要素组成的一个机械加工工艺系统。不同的工艺方法将要求有不同的加工单元，选择不同的加工工艺系统。对于一个机械制造工厂来说，除了要有车床、铣床、钻床、磨床等一系列切削加工工艺系统外，还应有铸造、锻压、热处理和装配等工艺系统。

3. 本课程的学习要求和学习方法

机械制造工艺学是机械、机电类专业的一门重要的专业课程。本课程的研究对象是机械零件的切削加工和装配工艺中具有共同性的规律，研究重点是机械加工工艺过程，包括零件的机械加工工艺过程和装配工艺过程两部分。

本课程主要介绍了机械加工工艺规程和装配工艺规程的设计方法和步骤，典型零件的表面加工方法，金属切削原理、金属切削机床和刀具、夹具、量具的基本知识，机械加工精度和表面质量的概念及其控制方法，以及国内外先进制造技术等方面的知识。

通过本课程的学习，要求掌握机械制造工艺过程的基本理论和基本知识，具有根据具体情况合理选择加工设备和刀具、夹具、量具等工艺装备的初步能力，了解影响机械加工精度和表面质量的各种因素，掌握保证加工质量的一般方法，具有编制中等复杂程度的机械制造

工艺规程和装配工艺规程的能力，具有分析和解决生产现场中一般工艺问题的能力，了解先进制造技术的内涵、工艺和发展趋势。

机械制造工艺学与其他基础课程和专业课程衔接紧密，学习时需要具备机械制图、工程材料、公差与配合、机械设计、金工实习等方面的知识和技能。同时，本课程具有较强的综合性和实践性，涉及毛坯制造、金属材料、热处理、公差配合等方面的知识，并且金属切削理论和机械制造工艺知识具有很强的实践性。因此，学习本课程时应理论联系实际，重视实践环节，通过金工实习、生产实习、课程实验、现场教学和课程设计等多种实践教学方法和手段，结合生产实际对工艺问题进行具体分析，以获得较为理想的教学效果。

项目二　机械加工工艺规程设计

【知识点】

- 机械制造工艺过程基本概念；
- 基准及其分类；
- 零件工艺路线的拟定；
- 工序尺寸与公差的确定；
- 工艺尺寸链的计算；
- 工艺过程的经济分析。

【技能点】

- 零件结构工艺分析；
- 毛坯的选择；
- 定位基准的选择；
- 加工方法的选择；
- 加工阶段的划分；
- 机床与工艺装备的选择；
- 工艺方案的技术经济分析；
- 零件机械加工工艺规程的编制。

2.1　项目导入

1. 任务案例

图 2-1 所示为某企业生产的、年产量达 2 0000 余件的阶梯轴零件图。毛坯材料为 45 钢，热处理硬度为 55～60HRC。试编制该零件的机械加工工艺规程，并填写工艺文件。

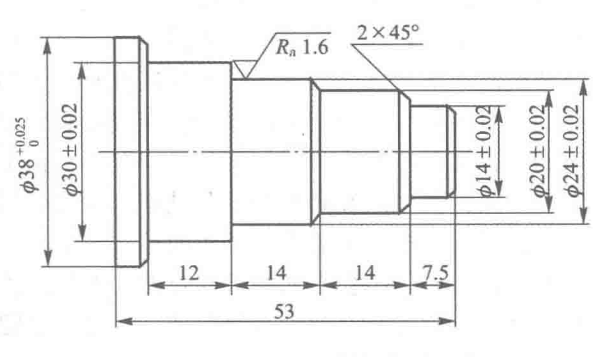


图 2-1　阶梯轴零件图

2. 任务要求

按照编写步骤编制零件的机械加工工艺过程卡和工序卡。

3. 任务引导

1）阅读零件图，对零件进行结构工艺

分析，判断其加工工艺性。

2）零件毛坯制造方式及毛坯尺寸如何确定？

3）确定零件机械加工工艺路线，如何选择定位基准、划分加工阶段、安排加工顺序等？

4）如何确定加工余量及工序尺寸？

5）制定工艺规程，如何确定工艺卡片的种类？

2.2 机械加工工艺过程与工艺规程

2.2.1 生产过程及机械加工工艺过程

1. 生产过程

生产过程是指将原材料转变为成品的过程。它包括：原材料的运输、保管和准备，产品的技术，生产准备，毛坯的制造，零件的机械加工及热处理，部件或产品的装配、检验、油漆、包装，以及产品的销售和售后服务等。

根据机械产品负责程度的不同，其生产过程可以由一个车间或一个工厂完成，也可以由多个车间或多个工厂联合完成。

原材料和成品是一个相对概念。一个工厂（或车间）的成品可以是另一个工厂的原材料或半成品，或者是本厂内另一个车间的原材料或半成品。例如，铸造车间、锻造车间的成品（铸件、锻件）就是机械加工车间的原材料，而机械加工车间的成品又是装配车间的原材料。这种生产上的分工，可以使生产趋于专业化、标准化、通用化、系列化，便于组织管理，利于保证质量、提高生产率和降低成本。

2. 工艺过程

工艺过程是生产过程中，直接改变生产对象的形状、尺寸及相对位置和性质等，使其成为成品或半成品的过程。机械产品的工艺过程又可分为铸造、锻造、焊接、冲压、机械加工、热处理、装配、油漆等工艺过程。

采用机械加工方法（切削或磨削）直接改变毛坯的形状、尺寸、相对位置与性质等，使其成为零件的工艺过程称为机械加工工艺过程。从广义上来说，特种加工也是机械加工工艺过程的一部分，但其实质已经不是切削加工范畴。机械加工工艺过程直接决定零件和机械产品的精度，对产品的成本、生产周期都有较大的影响，是整个工艺过程的重要组成。

在具体的生产条件下，以最合理或者较合理的工艺过程，用文字按规定的表格形式书写成的工艺文件，称为机械加工工艺规程，简称工艺规程。工艺规程是在总结实践经验的基础上，根据科学理论和必要的工艺试验制定的，用于规定产品或零部件制造工艺过程和操作方法，是组织生产和进行技术准备的根本依据。当然，工艺规程也不是一成不变的，随着科学技术的进步，一定会有新的更为合理的工艺规程代替旧的相对不合理的工艺规程。但工艺规程的修订必须经过充分的实验论证，并需严格履行一定的审批手续。

3. 机械加工工艺过程的组成

用机械加工的方法直接改变毛坯形状、尺寸和机械性能等，使之变为合格零件的过程，称为机械加工工艺过程。机械加工工艺过程由一个或若干个顺序排列的工序组成，而工序又

可分为若干个安装、工位、工步和行程。

（1）工序

一个（或一组）工人在一个工作地点（如一台机床或一个钳工台），对一个（或同时对几个）工件连续完成的工艺过程，称为工序。它包括在这个工件上连续进行的直到转向加工下一个工件为止的全部动作。区分工序的主要依据是工作地点固定和工作连续。

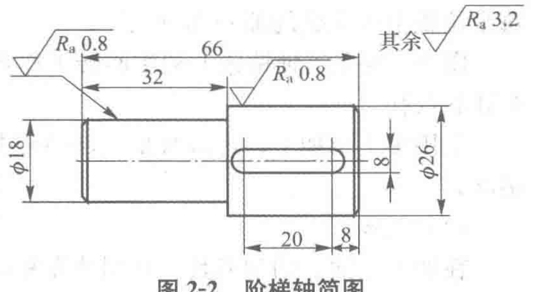


图 2-2 阶梯轴简图

工序是组成工艺过程的基本单元，也是制订生产计划、进行经济核算的基本单元。图 2-2 所示阶梯轴的加工工艺过程见表 2-1 和表 2-2。

表 2-1 阶梯轴加工工艺过程（生产量较小）

工序号	工序内容	设备
1	车端面，钻中心孔	车床
2	车外圆，倒角	车床
3	铣键槽，去毛刺	铣床
4	磨外圆	磨床

表 2-2 阶梯轴加工工艺过程（生产量较大）

工序号	工序内容	设备
1	铣端面，打中心孔	铣端面打中心孔机床
2	车大外圆及倒角	车床
3	车小外圆及倒角	车床
4	铣键槽	铣床
5	去毛刺	钳工台
6	磨外圆	磨床

（2）安装

工件加工前，使其在机床或夹具中相对刀具占据正确位置并给予固定的过程，称为装夹。换句话说，装夹包括定位和夹紧两过程。安装是指工件通过一次装夹后所完成的那一部分工序。

例如：表 2-1 中的第 1 道工序，若对工件的两端连续进行车端面、钻中心孔，就需要两次安装。先装夹工件一端，车端面，钻中心孔，称为安装 1；再调头装夹，车另一端面，钻中心孔，称为安装 2。工件在加工中应尽量减少装夹次数，多一次装夹，就会增加装夹的时间，还会增加装夹误差。

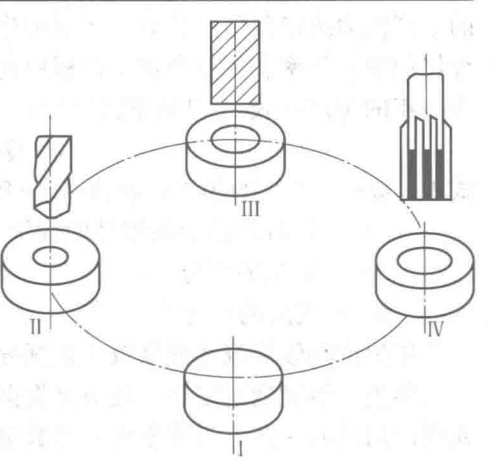


图 2-3 多工位加工

（3）工位

工位是指在一次装夹中，工件在机床上所占的

每个位置上所完成的那一部分工序。

图 2-3 为在三轴钻床上利用回转工作台，按四个工位连续完成每个工件的装夹、钻孔、扩孔和铰孔。

采用多工位加工，可以减少工件的装夹次数，提高生产率和保证被加工表面的相互位置精度。

（4）工步

在加工表面、切削刀具、切削速度和进给量都不变的情况下所完成的那部分工序，称之为工步。工步是构成工序的基本单元。如表 2-1 中第一道工序，每次安装有两个工步：车端面为工步 1，钻中心孔为工步 2。

为了提高生产率，常常用几把刀具同时加工几个表面，这也可看作一个工步，称为复合工步。如表 2-2 中铣端面和钻中心孔，每个都是用两把刀具同时铣两端面或钻两端中心孔，它们都是复合工步。

除上述工步概念外，还有辅助工步，它是由人和设备连续完成的一部分工序，该工序不改变工件的形状、尺寸和表面粗糙度，但它是完成工步所必需的，如更换工具等。引入辅助工步的概念，是为了能精确计算工步工时。

（5）行程

行程有工作行程和空行程之分。工作行程是指刀具以加工进给速度相对于工件进行一次切削所完成的那部分工作。空行程是指刀具以非加工进给速度相对于工件所完成的那部分工作。

引入行程的概念是为了反映工步中的进给次数和工序卡片中的相吻合，并能精确计算工步工时，它比走刀更科学。

2.2.2 生产纲领和生产类型

1. 生产纲领

生产纲领是指企业在计划期内应生产的产品数量和进度计划。企业根据市场需求和自身的生产能力决定其生产计划。产品的生产纲领确定后，就可根据某零件在产品中的数量，供维修用的备品率和在整个加工过程中允许的废品率来确定该零件的生产纲领。零件在计划期为一年的生产纲领 N 可按下式计算：

$$N=Qn(1+a\%)(1+b\%)$$

式中 Q——产品的年生产纲领（台/年）；

n——每台产品中该零件的数量（件/台）；

a——备品的百分率；

b——废品的百分率。

年生产纲领是设计或修改工艺规程的重要依据，是车间（或工段）设计的基本文件。

年生产纲领确定之后，还应该根据车间（或工段）的具体情况，确定在计划期内一次投入或产出的同一产品（或零件）的数量，即生产批量。零件生产批量的计算公式如下：

$$n=\frac{NA}{F}$$

式中 n——每批中的零件数量；

N——年生产纲领规定的零件数量；

A——零件应该储备的天数；

F——一年中工作日天数。

2. 生产类型

生产类型是指企业（或车间、工段、班组、工作地）生产专业化程度的分类，一般分为大量生产、成批生产和单件生产 3 种类型。

（1）大量生产

在大量生产中，产品的数量很大，其结构和规程比较固定，大多数工作地点长期进行某一零件的某一道工序的加工。例如汽车、拖拉机、轴承、洗衣机、自行车等的制造，通常都是以大量生产的方式进行的。

（2）成批生产

一年中分批地生产相同的零件，生产成周期性的重复，一批零件加工完以后，调整加工设备和工艺装备，再加工另一批零件。例如普通机床、食品机械和纺织机械等的制造，都是比较典型的成批生产类型。按照批量的大小，成批生产又可分为小批生产、中批生产及大批生产 3 种类型。

（3）单件生产

单个或少数几个工作地点生产不同结构、尺寸的产品，生产过程中各工作地点的工作完全不重复或很少重复。例如：重型机械、专用设备的制造及大型船舶等的制造属于单件生产。

生产类型的划分主要取决于生产纲领，即年产量，但也要考虑产品本身的大小和结构的复杂程度。例如，一台重型镗铣床比一台台钻要大得多，也复杂得多。生产 20 台台钻只能是单件生产，而生产 20 台重型镗铣床则属于小批生产。

根据前面公式计算的零件生产纲领，参考表 2-3 即可确定生产类型。

表 2-3　生产类型和生产纲领的关系

生产类型		生产纲领（件/年或台/年）		
		重型（30kg 以上）	中型（4～30kg）	轻型（4kg 以下）
单件生产		5 以下	10 以下	100 以下
批量生产	小批量生产	5～100	10～200	100～500
	中批量生产	100～300	200～500	500～5 000
	大批量生产	300～1 000	500～5 000	5 000～50 000
大量生产		1 000 以上	5 000 以上	50 000 以上

不同生产类型的零件加工工艺有很大的不同。产量大、产品固定时，有条件采用各种高生产率的专用机床和专用工装，因而劳动生产率高、成本低。但在产量小、产品品种多时，就不宜采用专用设备与工装，因为调整时间长，机床利用率高，成本反而会增加。表 2-4 列出了各种生产类型的生产纲领及工艺特点。

随着技术进步和市场需求的变化，生产类型的划分正在发生着深刻的变化，传统的大批大量生产往往不能适应产品及时更新换代的需要，而单件小批生产的生产能力又跟不上市场之急需，因此生产类型都朝着生产过程柔性化的方向发展。成组技术（包括成组工艺、成组

夹具）为这种柔性化生产提供了重要的基础。

表 2-4　各种生产类型的工艺特点

工艺特点	单件生产	批量生产	大量生产
毛坯的制造方法	铸件用木模手工造型，锻件用自由锻	铸件用金属模造型，部分锻件用模锻	铸件广泛用金属模机器造型，锻件用模锻
零件互换性	无须互换、互配零件可成对制造，广泛用修配法装配	大部分零件有互换性，少数用修配法装配	全部零件有互换性，某些要求精度高的配合，采用分组装配
机床设备及其布置	采用通用机床，按机床类别和规格采用“机群式”排列	部分采用通用机床，部分采用专用机床，按零件加工分“工段”排列	广泛采用生产率高的专用机床和自动机床，按流水线形式排列
夹具	很少用专用夹具，由划线和试切法达到设计要求	广泛采用专用夹具，部分用划线法进行加工	广泛用专用夹具，用调整法达到精度要求
刀具和量具	采用通用刀具和万能量具	较多采用专用刀具和专用量具	广泛采用高生产率的刀具和量具
对技术工人要求	需要技术熟练的工人	各工种需要一定熟练程度的技术工人	对机床调整工人技术要求高，对机床操作工人技术要求低
对工艺文件的要求	只有简单的工艺过程卡	有详细的工艺过程卡或工艺卡，零件的关键工序有详细的工序卡	有工艺过程卡、工艺卡和工序卡等详细的工艺文件

2.2.3　机械加工工艺规程

1. 定义

在具体的生产条件下，以最合理或者较合理的工艺过程，用文字按规定的表格形式书写成的工艺文件，称为机械加工工艺规程，简称工艺规程。工艺规程是在总结实践经验的基础上，根据科学理论和必要的工艺试验制定的，用于规定产品或零部件的制造工艺过程和操作方法，是组织生产和进行技术准备的根本依据。当然，工艺规程也不是一成不变的，随着科学技术的进步，一定会有新的、更为合理的工艺规程代替旧的、相对不合理的工艺规程。但工艺规程的修订必须经过充分的实验论证，并需严格履行一定的审批手续。

2. 工艺规程的作用

一般来说，大批大量生产类型要求有细致和严密的组织工作，因此要求有比较详细的机械加工工艺规程。单件小批生产由于分工上比较粗糙，因此其机械加工工艺规程可以简单一些。但是，不论生产类型如何，都必须有章可循，即都必须有机械加工工艺规程，这是因为：

1）它是指导生产的主要技术文件，起生产的指导作用；

2）它是生产组织和生产管理的依据，是生产计划、调度、工人操作和质量检验等的依据；

3）它是新建或扩建工厂或车间的主要技术资料。

总之，零件的机械加工工艺规程是每个机械制造厂或加工车间必不可少的技术文件。生产前用它做生产的准备，生产中用它做生产的指挥，生产后用它做生产的检验。

3. 工艺规程的格式

为了适应工业发展的需要，加强科学管理和便于交流，原机械电子工业部还制定了指导性技术文件 JB/Z187.3—88《工艺规程格式》，要求各机械制造厂按统一规定的格式填写。按照规定，属于机械加工工艺规程的有：

1）机械加工工艺过程卡片；

2）机械加工工序卡片；

3）标准零件或典型零件工艺过程卡片；

4）单轴自动车床调整卡片；

5）多轴自动车床调整卡片；

6）机械加工工序操作指导卡片；

7）检验卡片等。

最常用的是机械加工工艺过程卡片和机械加工工序卡片，见表 2-5 和表2-6。

表 2-5 机械加工工艺过程卡片

		机械加工工艺过程卡片		产品型号		零件图号								
				产品名称		零件名称		共 页		第 页				
材料牌号		毛坯种类		毛坯外形尺寸		每毛坯件数		每台件数		备注				
工序号	工序名称	工序内容			车间	工段	设备	工艺装备			工时			
											准终	单件		
										设计（日期）	校对（日期）	审核（日期）	标准化（日期）	会签（日期）
标记	处数	更改文件号	签字	日期	标记	处数	更改文件号	签字	日期					

表 2-5 为机械加工工艺过程卡片，此卡片的特点是以工序为单位，简要说明产品或零、部件的加工过程的一种工艺文件，是生产管理的主要技术文件，广泛用于成批生产和单件小批生产中比较重要的零件。

表 2-6 为机械加工工序卡片，此卡片的特点：是在工艺过程卡片的基础上按每道工序所编的一种工艺文件，一般具有工序简图，并详细说明该工序每个工步的加工内容、工艺参数、操作要求及所用设备和工艺装备等，主要用于大批大量生产中的所有零件、中批生产中的重要零件和单件小批生产中的关键工序。

表 2-6 机械加工工序卡片

<table>
<tr><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">机械加工工序卡片</td><td>产品型号</td><td></td><td>零件图号</td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>产品名称</td><td></td><td>零件名称</td><td></td><td>共 页</td><td>第 页</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="13"></td><td>车间</td><td>工序号</td><td>工序名称</td><td colspan="2">材料牌号</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>毛坯种类</td><td>毛坯外形尺寸</td><td>每毛坯可制件数</td><td colspan="2">每台件数</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>设备名称</td><td>设备型号</td><td>设备编号</td><td colspan="2">同时加工件数</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">夹具编号</td><td>夹具名称</td><td colspan="2">切削液</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">工位器具编号</td><td rowspan="2">工位器具名称</td><td colspan="2">工序工时/min</td></tr>
<tr><td>准终</td><td>单件</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>标记</td><td>处数</td><td>更改文件号</td><td>签字</td><td>日期</td><td>标记</td><td>处数</td><td>更改文件号</td><td>签字</td><td>日期</td></tr>
</table>

4. 制定工艺规程的原始资料

1）产品装配图、零件图；

2）产品验收质量标准；

3）产品的生产纲领；

4）毛坯材料与毛坯生产条件；

5）制造厂的生产条件（包括机床设备和工艺装备的规格、性能和现在的技术状态，工人的技术水平，工厂自制工艺装备的能力以及工厂供电、供气的能力等有关资料）；

6）工艺规程设计、工艺装备设计所用设计手册和有关标准；

7）国内外先进制造技术资料等。

5. 工艺规程的设计原则

1）必须可靠保证零件图纸上所有技术要求的实现，即保证质量，提高工作效率；

2）保证经济上的合理性，即成本低要，消耗要小；

3）保证良好的安全工作条件，尽量减轻工人的劳动强度，保障生产安全，创造良好的工作环境；

4）要从本厂实际出发，所制定的工艺规程应立足于本企业实际条件，并具有先进性，尽量采用新工艺、新技术、新材料；

5）所制定的工艺规程随着实践的检验和工艺技术的发展与设备的更新，应能不断地修订完善。

6. 机械加工工艺规程设计的内容及步骤

1）分析零件图和产品装配图。了解产品的用途、性能和工作条件，熟悉零件在产品中的地位和作用。

2）对零件图和装配图进行工艺审查。审查图纸上的尺寸、视图和技术要求是否完整、正确；找出主要技术要求和关键的技术问题；审查零件的结构工艺性。

3）由零件生产纲领确定零件生产类型。

4）熟悉和确定毛坯种类。

5）拟定零件加工工艺路线。这是制定机械加工工艺规程的核心。其主要内容包括选择定位基准、确定加工方法、安排加工顺序以及安排热处理、检验和其他工序。机械加工工艺路线的最终确定，一般要通过一定范围的论证，即通过对几条工艺路线的分析与比较，从中选出一条适合本工厂条件的，确保加工质量、高效和低成本的最佳工艺路线。

6）确定各工序所用机床设备和工艺装备（含刀具、夹具、量具、辅具等）对需要改装或重新设计的专用工艺装备应提出具体设计任务书。

7）确定各工序的加工余量，计算工序尺寸及公差。

8）确定各工序的技术要求及检验方法。

9）确定各工序的切削用量。通常，在单件小批生产时，切削用量多由操作者自行决定，机械加工工艺过程卡中一般不作明确规定。在中批，特别是在大批大量生产时，为了保证生产的合理性和节奏均衡，则要求必须规定切削用量，并不得随意改动。

10）确定工时定额。

11）编制工艺文件。

2.3 零件结构工艺性分析

零件图是编制工艺规程最主要的原始资料。在编制工艺规程时，应先根据零件图了解该零件的功用、结构特点及与其他零件的关系，分析各项公差和技术要求的制定依据，从中找出主要技术要求和关键技术问题。

零件的结构工艺性是指所设计的零件在能满足使用要求的前提下，制造的可行性和经济性。因此，在保证产品或零件使用要求的前提下，其结构应能满足机械制造过程的工艺要

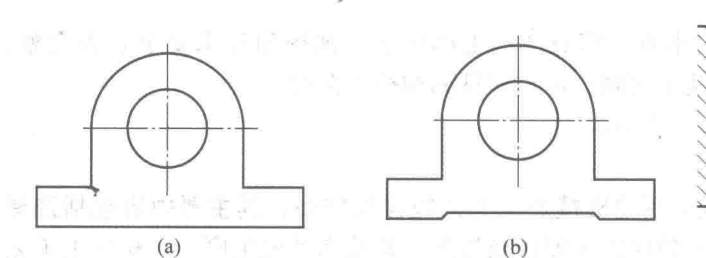
求，有利于应用先进的、高效率的加工方法，从而降低生产成本，提高劳动生产率。

产品的制造过程包括毛坯制造、机械加工、热处理、装配、油漆和包装等，这些过程都直接影响产品的经济指标。因此，在评定结构工艺性时，应全面分析零件各个制造过程的工艺性和整个生产过程的工艺性。

在零件整个制造过程中，机械加工的工作量和耗费的费用最多，所以机械加工的结构工艺性就显得特别重要，从机械加工的角度来讲，对零件结构工艺性有如下要求：

1. 减少加工表面的面积

这不仅可以减少加工的劳动量，减少材料和刀具的消耗，还能减少装配接触面，有利于提高装配精度。如图 2-4 所示的轴承架与机体的结合面，可用两个小平面代替整个结合面，以减少加工面的面积。如图 2-4（a）所示轴承座底平面较大、图 2-4（c）所示孔的有效长度过长，加工时就会增加劳动量、材料和刀具的消耗，且不利于提高装配精度。改进后的结构如图 2-4（b）、（d）所示，就比较合理。



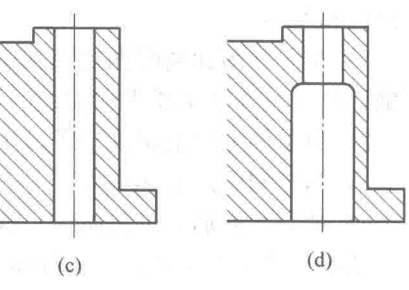


图 2-4 加工表面的面积

（a）改进前结构；（b）改进后结构；（c）改进前结构；（d）改进后结构

2. 零件结构应便于加工和装夹

使刀具或量具能够接近待加工面，以减少加工时间，避免使用特殊夹具。如图 2-5 所示的油孔，改进后的结构可免用专用工具。如图 2-6 所示的孔的位置，改进后的结构可用标准麻花钻加工，使零件在加工过程中便于装夹和减少安装次数。再如图 2-7 所示的零件，改进前的结构钻孔时要多次安装改进后则可使各孔在一次安装中加工完毕。

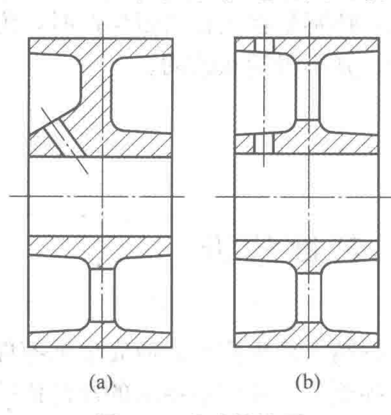


图 2-5 油孔的位置

（a）改进前结构；（b）改进后结构

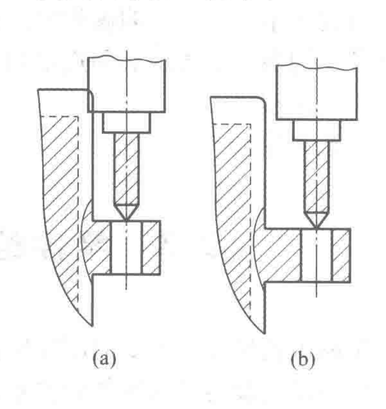


图 2-6 易于刀具接近加工表面的零件结构

（a）改进前结构；（b）改进后结构

3. 零件的结构应考虑到所用的加工方法和刀具，设计退刀结构

图 2-8 所示为螺纹退刀槽和砂轮越程槽。

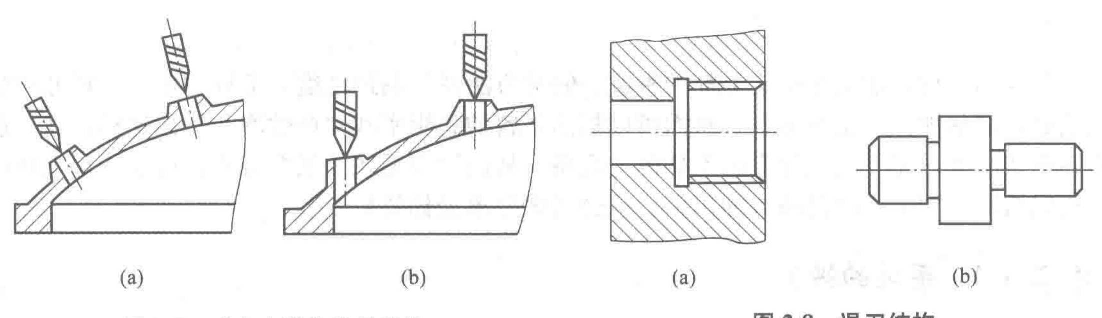


图 2-7　减少安装次数的结构

（a）改进前结构；（b）改进后结构

图 2-8　退刀结构

（a）螺纹退刀槽；（b）砂轮越程槽

4. 零件的结构应考虑到加工时的安全

图 2-9（a）所示的结构，由于麻花钻刚性较差，当其轴线与孔的入口或出口平面呈倾斜位置时会引起单侧切削而容易折断。改进后的结构如图 2-9（b）所示，保证了在整个切削过程中两个切削刃同时对称切削。

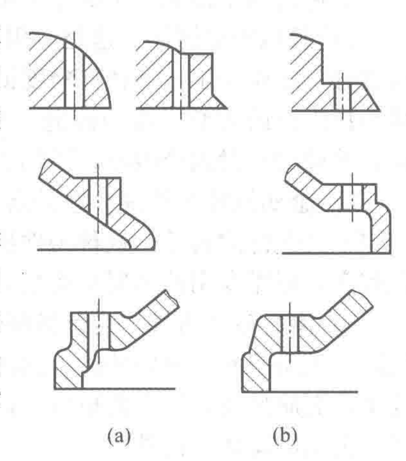


图 2-9　孔端的结构

（a）改进前结构；（b）改进后结构

5. 减少钻孔深度

钻深孔时要用专用钻头，钻头要多次重复退出，以排除切屑，因而增加了辅助时间。孔的深度增加，钻头的引偏程度也会增大，所以应尽可能使孔的深度不大于孔径的 5 倍。

6. 零件的结构应能在给定的生产条件和生产规模下采用先进工艺

零件的结构应具有良好的刚性，这样有利于采用较大的切削用量和先进刀具。在大批量生产时，零件的结构要适应高生产率切削的加工。

7. 同一零件多个加工面的尺寸尽可能一致

例如阶梯轴上各退刀槽的宽度，各键槽的宽度、齿轮模数、孔径、螺纹孔等应尽量统一，并符合标准，以便使用数量较少的标准刀具来加工，同时减少换刀等所消耗的时间。

此外，在满足结构工艺性要求的同时，还应注意节约原材料。应在不影响使用性能的条件下，以价廉的材料和适当的毛坯制造方法代替昂贵的材料来制造各种零件。

对工件进行工艺性分析的目的，是从工艺的角度审视工件，去除工艺制作的障碍，为后续各工序中确定加工方案奠定基础。

2.4 毛坯的选择

毛坯的选择，主要是确定毛坯的种类、制造方法及其制造精度。毛坯的形状、尺寸越接近成品，切削加工余量就越少，从而可以提高材料的利用率和生产效率，然而这样往往会使毛坯制造困难，需要采用昂贵的毛坯制造设备，从而增加毛坯的制造成本。所以选择毛坯时应从机械加工和毛坯制造两方面出发，综合考虑以求最佳效果。

2.4.1 毛坯的种类

毛坯的种类很多，同一种毛坯又有多种制造方法。

1. 铸件

铸件适用于形状复杂的零件毛坯。根据铸造方法的不同，铸件又分为以下几种：

1）砂型铸造铸件。这是应用最为广泛的一种铸件。它有木模手工造型和金属模机器造型之分。木模手工造型铸件精度低，加工表面需留较大的加工余量，生产效率低，适用于单件小批生产或大型零件的铸造。金属模机器造型生产效率高，铸件精度也高，但设备费用高，铸件的重量也受限制，适用于大批量生产的中小型铸件。

2）金属型铸造铸件。它是指将熔融的金属浇注到金属模具中，依靠金属自重充满金属铸型腔而获得的铸件。这种铸件比砂型铸造铸件精度高、表面质量和力学性能好，生产效率也较高，但需专用的金属型腔模，适用于大批量生产中的尺寸不大的有色金属铸件。

3）离心铸造铸件。它是指将熔融金属注入高速旋转的铸型内，在离心力的作用下，金属液充满型腔而形成的铸件。这种铸件晶粒细，金属组织致密，零件的力学性能好，外圆精度及表面质量高，但内孔精度差，且需要专门的离心浇注机，适用于批量较大的黑色金属和有色金属的旋转体铸件。

4）压力铸造铸件。它是指将熔融的金属在一定的压力作用下，以较高的速度注入金属型腔内而获得的铸件。这种铸件精度高，可达IT11～IT13；表面粗糙度值小，可达R_a3.2～0.4μm；铸件力学性能好，可铸造各种结构较复杂的零件，铸件上各种孔眼、螺纹、文字及花纹图案均可铸出，但需要一套昂贵的设备和型腔模；适用于批量较大的形状复杂、尺寸较小的有色金属铸件。

5）精密铸造铸件。它是指将石蜡通过型腔模压制成与工件一样的腊制件，再在腊制工件周围粘上特殊型砂，凝固后将其烘干焙烧，腊被蒸发而放出，留下工件形状的模壳，用来浇铸。精密铸造铸件精度高，表面质量好，一般用来铸造形状复杂的铸钢件，可节省材料，降低成本，是一项先进的毛坯制造工艺。

2. 锻件

锻件适用于强度要求高、形状比较简单的零件毛坯，其锻造方法有自由锻和模锻两种。

自由锻造锻件是在锻锤或压力机上用手工操作而成形的锻件。它的精度低，加工余量大，生产率也低，适用于单件小批生产的大型锻件。

模锻件是在锻锤或压力机上，通过专用锻模锻制成形的锻件。它的精度和表面粗糙度均比自由锻造的好，可以使毛坯形状更接近工件形状，加工余量小。同时，由于模锻件的材料

纤维组织分布好，锻制件的机械强度高。模锻的生产效率高，但需要专用的模具，且锻锤的吨位也要比自由锻造的大，主要适用于批量较大的中小型零件。

3. 焊接件

焊接件是根据需要将型材或钢板焊接而成的毛坯件，它制作方便、简单，但需要经过热处理才能进行机械加工，适用于单件小批生产中制造大型毛坯。其优点是制造简便，加工周期短，毛坯重量轻；缺点是焊接件抗振动性差，机械加工前需经过时效处理以消除内应力。

4. 冲压件

冲压件是通过冲压设备对薄钢板进行冷冲压加工而成的，它可以非常接近成品要求。冲压零件可以作为毛坯，还可以直接成为成品。冲压件的尺寸精度高，适用于批量较大而零件厚度较小的中小型零件。

5. 型材

型材主要通过热轧或冷拉而成。热轧的精度低，价格较冷拉的便宜，用于一般零件的毛坯。冷拉的尺寸小，精度高，易于实现自动送料，但价格贵，多用于批量较大且在自动机床上进行加工的情形。按其截面形状，型材可分为圆钢、方钢、六角钢、扁钢、角钢、槽钢以及其他特殊截面的型材。

6. 冷挤压件

冷挤压是指在室温下对金属坯料施加压力，使其产生塑性变形，并从模具凹模孔或凸、凹模间隙之间挤出，从而获得所需工件的加工方法。冷挤压毛坯精度高，表面粗糙度值小，可以不再进行机械加工，但要求材料塑性好，主要为有色金属和塑性好的钢材，适用于大批量生产中制造形状简单的小型零件。

7. 粉末冶金件

粉末冶金件是以金属粉末为原料，在压力机上通过模具压制成型后经高温烧结而成。其生产效率高，零件的精度高，表面粗糙度值小，一般可不再进行精加工，但金属粉末成本较高，适用于大批大量生产中压制形状较简单的小型零件。

2.4.2 毛坯的选择原则

1. 零件的材料及其力学性能

零件的材料大致确定了毛坯的种类，而其力学性能的高低，也在一定程度上影响毛坯的种类，如力学性能要求较高的钢件，其毛坯最好用锻件而不用型材，力学性能要求不高时则可以选用型材作为毛坯。

2. 生产类型

不同的生产类型决定了不同的毛坯制造方法。在大批量生产中，应采用精度和生产率都较高的、先进的毛坯制造方法，如铸件应采用金属模机器造型，锻件应采用模锻。单件小批生产则一般采用木模手工造型或自由锻等比较简单方便的毛坯制造方法。

3. 零件的结构形状和外形尺寸

零件的结构形状和外形也会影响毛坯的种类和制造方法。如常见的一般用途的钢质阶梯轴，当各台阶直径相差不大时可用型材，若各台阶直径相差很大时，宜用锻件；成批生产中，中小型零件可选用模锻，而大尺寸的钢轴受到设备和模具的限制，一般选用自由锻等。

4. 充分考虑利用新工艺、新技术和新材料

为节约新材料和能源，提高机械加工生产率，应充分考虑精炼、精锻、冷轧、冷挤压、工程塑料等在机械中的应用，这样可以大大减少机械加工量，甚至不需要进行加工，从而大幅提高了经济效益。

当然，在考虑上述诸因素的同时，不应当脱离具体的生产条件，如现场毛坯制造的实际水平和能力，毛坯车间近期的发展情况以及由专业化工厂提供毛坯的可能性等。

在确定了毛坯制造方式以后，应当了解和熟悉毛坯的特点，如铸件的分型面、浇注系统的位置、余量和拔模斜度等。通常以零件-毛坯合图的方式将它们表示出来，作为正式制定机械加工工艺规程的原始依据。

2.5 定位基准的选择

2.5.1 基准及其分类

工件是一个几何实体，它是由一些几何元素（点、线、面）构成的。其上任何一个点、线、面的位置总是用它与另外一些点、线、面的相互关系（几何尺寸、平行度、同轴度等）来确定的。用来确定生产对象上几何要素间的几何关系所依据的那些点、线、面叫作基准。

根据基准的功用不同，可以分为设计基准和工艺基准。

1. 设计基准

在设计图样上所采用的基准为设计基准。如图 2-10 所示的轴套零件，外圆和孔的设计基准是它们的轴心线；端面 *A* 是端面 *B*，*C* 的设计基准；内孔 *D* 的轴心线是 ϕ25h6 外圆径向圆跳动的设计基准。

对于某一个位置要求（包括两个表面之间的尺寸或者位置精度）而言，在没有特殊指明的情况下，它所指向的两个表面之间常常是互为设计基准的。图 2-10 中，对于尺寸 40mm 来说，*A* 面是 *C* 面的设计基准，也可以认为 *C* 面是 *A* 面的设计基准。

零件上某一点、线、面的位置常由几个尺寸（或位置公差）来确定，此时对应每一个要求便有一个设计基准。

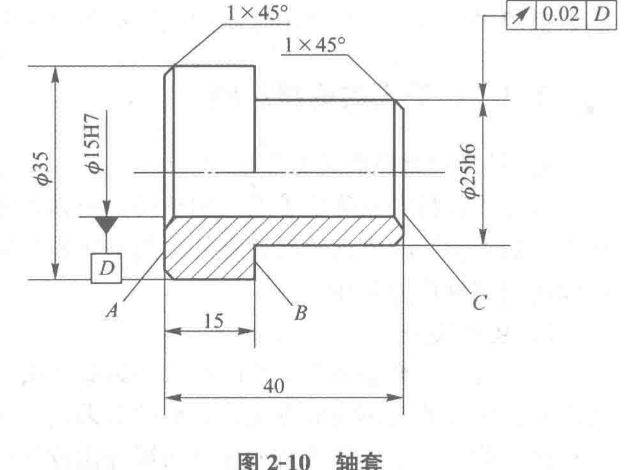


图 2-10 轴套

2. 工艺基准

工艺基准是指在机械加工工艺过程中用来确定被加工表面加工后尺寸、形状、位置的基准。工艺基准按其用途不同又可分为定位基准、测量基准、装配基准和工序基准。

1）定位基准。定位基准是指工件上与夹具定位元件直接接触的点、线和面，在加工中用于定位时，它使工件在工序尺寸方向上获得确定的位置。定位基准一般是由工艺人员选定

的，它对于获得零件加工后的尺寸和位置精度，起着重要的作用。

2）测量基准。测量工件已加工表面尺寸及位置的基准，称为测量基准。如图 2-10 所示，工件以内孔套在心轴上测量外圆 ϕ25h6 的径向圆跳动，则内孔为外圆的测量基准；用卡尺测量尺寸 15mm 和 40mm，表面 A 是表面 B，C 的测量基准。

3）装配基准。装配时用来确定零件或部件在产品中的相对位置所采用的基准，称为装配基准。如箱体零件的底面、主轴的主轴颈以及齿轮的孔和端面等。

4）工序基准。在工序图上，为了标注本工序加工面的尺寸和位置，采用的基准称为工序基准。工序基准应尽量与设计基准相重合，当考虑定位或试切测量方便时，也可以与定位基准或测量基准相重合。

2.5.2 定位基准的选择

定位基准不仅影响工件的加工精度，而且对同一个被加工表面所选用的定位基准不同，其工艺路线也可能不同。因此，选择工件的定位基准是十分重要的。机械加工的最初工序只能用工件毛坯上未经加工的表面作为定位基准，这种定位基准称为粗基准。用已经加工过的表面作为定位基准称为精基准。在制定零件机械加工工艺规程时，总是先考虑选择怎样的精基准定位把工件加工出来，然后考虑选择什么样的粗基准定位，把作为精基准的表面加工出来。

1. 粗基准选择原则

选择粗基准时，主要考虑两个问题：一是保证加工面与不加工面之间的相互位置精度要求；二是合理分配各加工面的加工余量。具体选择时参考下列原则：

1）对于同时具有加工表面和不加工表面的零件，为了保证不加工表面与加工表面之间的位置精度，应选择不加工表面作为粗基准。

如图 2-11（a）所示零件的毛坯，在铸造时毛坯孔和外圆面难免有偏心。加工时，如果采用不加工的外圆面作为粗基准装夹工件，用三爪自定心卡盘夹住外圆面进行加工，则加工面与不加工面外圆面同轴，可以保证壁厚均匀，但是加工面的加工余量则不均匀。如果采用该零件的毛坯孔作为粗基准装夹工件（直接找正装夹，用四爪卡盘装夹住外圆面，按毛坯孔找正）进行加工，则加工面与该面的毛坯孔同轴，加工面的加工余量是均匀的，但是加工面与不加工面（外圆面）不同轴，即壁厚不均匀，如图 2-11（b）所示。

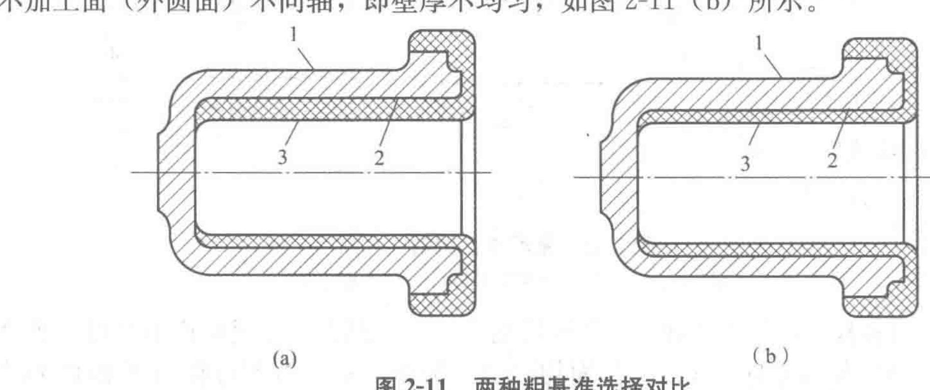


图 2-11 两种粗基准选择对比

（a）以外圆为粗基准；（b）以内孔为粗基准

1—外圆面；2—加工面；3—毛坯孔

2）对于有多个被加工表面的工件，选择粗基准时，应考虑合理分配各加工表面的加工余量。

a. 应保证各主要表面有足够的余量。为了满足这个要求应选择毛坯余量最小的表面作为粗基准，如图 2-12 所示的阶梯轴应选择 ϕ55mm 的外圆表面作粗基准。如果选 ϕ108mm 外圆表面为粗基准加工 ϕ55mm 外圆表面，当两个外圆表面相差为 3mm 时，则加工后的 ϕ55mm 外圆表面，将因一侧加工余量不足而出现毛面，使工件报废。

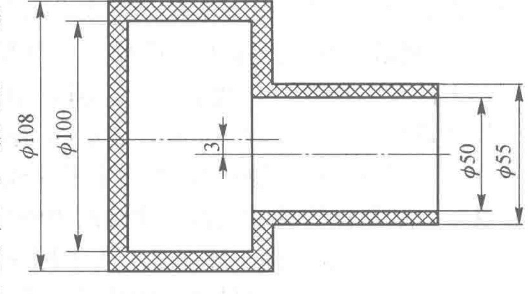


图 2-12　阶梯轴粗基准选择

b. 对于工件上的某些重要表面，为了尽可能使其表面加工余量均匀，则应选择重要表面作为粗基准。如图 2-13 所示的床身导轨表面是重要表面，车床床身粗加工时，应选择导轨表面作为粗基准先加工床脚面，再以床脚面为精基准加工导轨面。

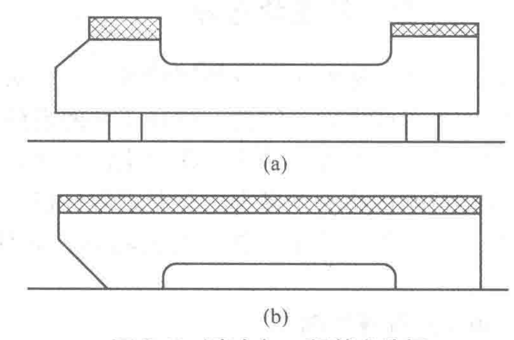


图 2-13　床身加工粗基准选择

（a）以导轨面为粗基准加工床脚；（b）以床脚为基准加工导轨面

3）粗基准应避免重复使用，在同一尺寸方向上，粗基准通常只能用一次。因为毛坯表面粗糙且精度低，所以重复使用将产生较大误差。

4）粗基准应定位可靠，选择作为粗基准的平面应平整，没有浇冒口或飞边等缺陷，以便定位可靠，夹装方便。

2. 精基准选择原则

精基准的选择应从保证零件加工精度出发，兼顾夹具结构简单的要求。选择精基准一般应按照如下原则选取：

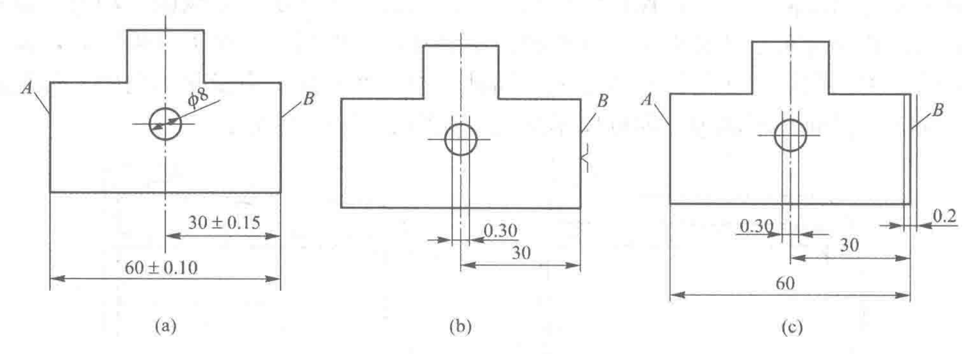


图 2-14　基准重合原则

（a）零件简图；（b）以 *B* 面定位；（c）以 *A* 面定位

1）基准重合选择。应尽可能选择零件设计基准为定位基准，以避免产生基准不重合误差。如图 2-14（a）所示零件，*A* 面、*B* 面均已加工完毕，钻孔时若选择 *B* 平面作为精基准，则定位基准与设计基准重合，尺寸（30±0.15）mm 可直接保证，加工误差易于控制。

如图 2-14（b）所示；若选择 A 面作为精基准，则尺寸（30±0.15）mm 是间接保证的，产生基准不重合误差。影响尺寸精度的因素除与本工序钻孔有关的加工误差外，还有与前道工序加工 B 面有关的加工误差，如图 2-14（c）所示。

2）基准统一原则。应采用同一基准定位加工零件上尽可能多的表面，这就是基准统一原则。这样做可以简化工艺规程的制定工作，减少夹具设计、制造的工作量和成本，缩短生产准备周期；由于减少了基准转换，所以便于保证各加工表面的相互位置精度。例如加工轴类零件时，采用两中心孔定位加工各外圆表面，就符合基准统一原则。箱体类零件采用一面两孔定位，齿轮的齿坯和齿形加工多采用齿轮的内孔及一端面为定位基准，均属于基准统一原则。

3）自为基准原则。某些要求加工余量小而均匀的精加工工序，选择加工表面本身作为定位基准，称为自为基准原则。如图 2-15 所示的导轨面磨削，在导轨磨床上，用百分表找正导轨面相对于机床运动方向的正确位置，然后加工导轨面以保证导轨面加工余量均匀，满足对导轨面的质量要求，还有浮动镗刀镗孔、珩磨孔、无心磨外圆等也都是自为基准的实例。

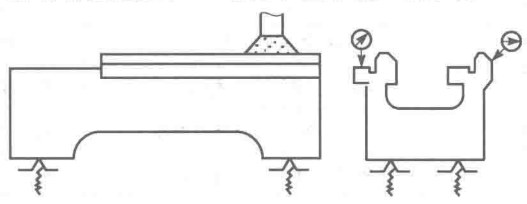


图 2-15 自为基准的实例

4）互为基准原则。当对工件上两个相互位置精度要求很高的表面进行加工时，需要用两个表面互相作为基准，反复进行加工，以保证位置精度要求。例如要保证精密齿轮的齿圈跳动精度，在齿面淬硬后，先以齿面定位磨内孔，再以内孔定位磨齿面，从而保证位置精度。

此外，所选精基准应保证工件安装可靠，夹具设计简单、操作方便。

注意：基准选择的各项原则有时是互相矛盾的，选用时必须根据实际条件和生产类型来综合考虑，从而达到定位精度高、夹紧可靠、夹具结构简单、操作方便的目的。

2.6 工艺路线的拟定

2.6.1 加工经济精度和加工方法的选择

1. 加工经济精度

不同的加工方法如车、磨、刨、铣、钻、镗等，所能达到的精度和表面粗糙度都是在一定范围内的。任何一种加工方法，只要精心操作、细心调整、选择合适的切削用量，其加工精度就可以得到提高，其加工表面粗糙度就可以减小。但是加工精度提得愈高，表面粗糙度减小得愈小，则所耗费的时间与成本也会愈大。即使是同一种加工方法，在不同的加工条件下所得到的精度和表面粗糙度也大不一样，这是因为在加工过程中，将有各种因素对精度和表面粗糙度产生影响，如工人的技术水平、切削用量、刀具的刃磨质量、机床的调整质量等等。

某种加工方法所能达到的加工经济精度是指在正常的工作条件下（包括完好的机床设备、必要的工艺装备、标准的工人技术等级、标准的耗用时间和生产费用）所能达到的加工精度和表面粗糙度。

经济表面粗糙度的概念类同于经济精度的概念。

各种加工方法所能达到的经济精度和经济表面粗糙度等级，以及各种典型表面的加工方法均已制成表格，在机械加工的各种手册中都能找到。表2-7～表2-9分别摘录了外圆、孔和平面等典型表面的加工方法及其经济精度和经济表面粗糙度。

表 2-7　外圆表面加工方案

序号	加工方案	经济精度（公差等级）	经济粗糙度值/μm	适用范围
1	粗车	IT11～IT13	50～12.5	适用于淬火钢以外的各种金属
2	粗车一半精车	IT8～IT10	6.3～3.2	
3	粗车一半精车一精车	IT7～IT8	1.6～0.8	
4	粗车一半精车一精车一滚压	IT7～IT8	0.2～0.025	
5	粗车一半精车一磨削	IT7～IT8	0.8～0.4	主要用于淬火钢，也可用于未淬火钢，但不适用于有色金属
6	粗车一半精车一粗磨一精磨	IT6～IT7	0.4～0.1	
7	粗车一半精车一粗磨一精磨一超精加工	IT5	0.1～0.012	
8	粗车一半精车一精车一精细车	IT6～IT7	0.4～0.025	主要用于要求较高的有色金属
9	粗车一半精车一粗磨一精磨一超精磨	IT5 以上	0.025～0.006	极高精度的外圆加工
10	粗车一半精车一粗磨一精磨一研磨	IT5 以上	0.1～0.012	

表 2-8　内孔表面加工方案

序号	加工方案	经济精度（公差等级）	经济粗糙度值/μm	适用范围
1	钻	IT11～IT13	12.5	加工未淬火钢及铸铁的实心毛坏，也可用于加工有色金属。孔径小于15～20mm
2	钻一铰	IT8～IT10	6.3～1.6	
3	钻一粗铰一精铰	IT7～IT8	1.6～0.8	
4	钻一扩	IT10～IT11	12.5～6.3	加工未淬火钢及铸铁的实心毛坯，也可用于加工有色金属。孔径大于15～20mm
5	钻一扩一铰	IT8～IT9	3.2～1.6	
6	钻一扩一粗铰一精铰	IT7	1.6～0.8	
7	钻一扩一拉	IT7～IT9	0.4～0.1	大批大量生产
8	粗镗	IT11～IT13	12.5～6.3	除淬火钢外的各种材料，毛坯有铸出孔或锻出孔
9	粗镗一半精镗	IT9～IT10	3.2～1.6	
10	粗镗一半精镗一精镗	IT7～IT8	1.6～0.8	
11	粗镗一半精镗一磨孔	IT7～IT8	0.8～0.2	主要用于淬火钢，也可用于未淬火钢，但不宜用有色金属
12	粗镗一半精镗一粗磨一精磨	IT6～IT7	0.4～0.1	
13	粗镗一半精镗一精镗一金刚镗	IT6～IT7	0.4～0.05	精度要求较高的有色金属加工
14	钻一（扩）一粗铰一精铰一珩磨	IT6～IT7	0.2～0.025	精度要求很高的孔
15	粗镗一半精镗一精镗一珩磨	IT6～IT7	0.2～0.025	
16	以研磨代替上述方法中的珩磨	IT5～IT6	0.1～0.006	

表 2-9 平面加工方案

序号	加工方法	经济精度（公差等级）	表面粗糙度值 R_a/μm	适用范围
1	粗车	IT11～IT13	12.5～50	端面
2	粗车—半精车	IT8～IT10	3.2～6.3	
3	粗车—半精车—精车	IT7～IT8	0.8～1.6	
4	粗车—半精车—磨削	IT6～IT8	0.2～0.8	
5	粗刨（或粗铣）	IT11～IT13	6.3～25	一般不淬硬平面（端铣表面粗糙度 R_a 值较小）
6	粗刨（或粗铣）—精刨（或精铣）	IT8～IT10	1.6～6.3	
7	粗刨（或粗铣）—精刨（或精铣）—刮研	IT6～IT7	0.1～0.8	精度要求较高的不淬硬平面批量较大时宜采用宽刃精刨方案
8	以宽刃精刨代替上述刮研	IT7	0.2～0.8	
9	粗刨（或粗铣）—精刨（或精铣）—磨削	IT7	0.2～0.8	精度要求高的淬硬平面或不淬硬平面
10	粗刨（或粗铣）—精刨（或精铣）—磨削	IT6～IT7	0.025～0.4	
11	粗铣—拉	IT7～IT9	0.2～0.8	大量生产，较小的平面（精度视拉刀精度而定）
12	粗铣—精铣—磨削—研磨	IT5 以上	0.006～0.1（或 R_z0.05）	高精度平面

应该指出，随着机械工业的不断发展，工艺的改进和设备及工艺装备的更新，提高机械加工精度的研究工作一直在进行，加工精度在不断提高。因此各种加工方法的加工经济精度的概念也在发展，其指标也在不断提高。

2. 加工方法和加工方案的选择

一般情况下，根据零件的精度（包括尺寸精度、形状精度和位置精度以及表面粗糙度）要求，考虑本车间（或本工厂）现有工艺条件，考虑加工经济精度的因素选择加工方法，其具体考虑因素有：

1）根据加工表面的技术要求，确定加工方法和加工方案。这种方案必须在保证零件达到图纸要求方面是稳定而可靠的，并在生产率和加工成本方面是最经济合理的。

2）要考虑被加工材料的性质。例如淬火钢用磨削的方法加工，而有色金属则磨削困难，一般采用金刚镗或高速精密车削的方法进行精加工。

3）要考虑生产纲领，即考虑生产率和经济性问题。大批大量生产应选用高效率的加工方法，采用专用设备。例如平面和孔可用拉削加工，轴类零件可采用半自动液压仿型车床加工等。

4）应考虑本厂现有设备的加工经济精度和工艺能力。技术人员必须熟悉本车间（或本工厂）现有加工设备的种类、数量、加工范围、精度水平以及工人的技术水平，以充分利用现有资源，不断对原有设备、工艺装备进行技术改造，挖掘企业潜力，创造经济效益。

2.6.2 加工阶段的划分

制定工艺路线时，往往要把加工质量要求高的主要表面的工艺过程，按粗、精加工分开

的原则划分几个加工阶段，其他加工表面的工艺过程根据同一原则作相应的划分，并分别安排到由主要表面所确定的加工阶段中去，这样就可得到由各个加工阶段所组成的包含零件全部加工内容的整个零件的加工工艺过程。按照工序性质的不同，一个零件的加工工艺过程通常可以划分为几个阶段，当零件的加工质量要求较高时，都应划分为粗加工、半精加工和精加工 3 个阶段。当零件要求的精度及表面粗糙度很高时，还应该增加光整加工和超精密加工阶段。

1. 各加工阶段的主要任务

(1) 粗加工阶段

粗加工阶段是从坯料上切除大部分余量，使毛坯在形状和尺寸上接近零件成品。应采取措施尽可能提高生产率。同时为半精加工阶段提供精基准，并留有充分均匀的加工余量，为后续工序创造有利条件

(2) 半精加工阶段

此阶段的主要目的是消除主要表面经粗加工留下的误差，使其达到一定的精度，为精加工做准备，并完成次要表面的终加工（钻孔、攻丝、铣键槽等）。表面经过半精加工后，精度可达 IT10～IT12 级，表面粗糙度值 R_a 则为 6.3～3.2μm。

(3) 精加工阶段

此阶段的任务是保证各主要加工表面达到图样所规定的质量要求，精加工切除的余量很少。表面经精加工后可以达到较高的尺寸精度（IT7～IT10）和较小的表面粗糙度值（R_a 为 1.6～0.4μm）。

(4) 光整加工阶段

对于精度要求很高（IT5 级以上）、表面粗糙度要求很低（R_a 为 0.2μm 以下）的零件，必须有光整加工阶段。光整加工的典型方法有珩磨、研磨、抛光和超精加工等。这些加工方法不但能提高表面层物理力学性能、降低表面粗糙度，而且能提高尺寸精度和形状精度，但一般不能提高位置精度。

2. 划分加工阶段的主要目的

(1) 保证零件加工质量

因粗加工的切削余量大、切削用量、切削热及功率都较大，因而工艺系统受力变形、热变形及工件内应力变形都较大，从而导致工件加工精度低和加工表面粗糙。为此要通过后续阶段，以较小的加工余量和切削用量来逐步消除或减少已产生的误差和减小表面粗糙度。同时，各加工阶段之间的时间间隔可起到自然时效的作用，有利于使工件消除内应力并充分变形，以便在后续工序中加以修正。

(2) 有利于及早发现毛坯缺陷并得到及时处理

毛坯的各种缺陷如气孔、砂眼和加工余量不足等，在粗加工后即可发现，便于及时修补或决定报废，以免继续加工后造成工时和费用的浪费。

(3) 有利于合理利用机床设备

粗加工要求使用功率大、刚性好、生产率高、精度要求不高的设备。精加工则要求使用精度高的设备。划分加工阶段后，就可充分发挥粗、精加工设备的特点，做到合理使用设备。

(4) 便于安排热处理工序

安排热处理工序必须将加工过程划分成几个阶段，否则很难充分发挥热处理的效果。例如，某些轴类零件，在粗加工后安排调质，在半精加工后安排淬火，最后进行精加工。这样不仅容易满足零件的性能要求，而且淬火引起的变形又可通过精加工工序予以消除。

（5）表面精加工安排在最后，可避免或减少在夹紧和运输过程中损伤已加工过的表面

在拟定零件的工艺路线时，一般都要遵循划分加工阶段这一原则，但在具体应用时要灵活掌握，不能绝对化。例如对于精度和表面质量要求较低而工件刚性足够、毛坯精度较高、加工余量小的工件，可不划分加工阶段。又如对一些刚性好的重型零件，由于装夹吊运很费时，所以往往不划分加工阶段而在一次安装中完成粗、精加工。

另外，将工艺过程划分成几个加工阶段是对整个加工过程而言的，不能以单纯从某一表面的加工或某一工序的性质来判断，例如工件的定位基准在半精加工阶段甚至在粗加工阶段就需要加工得很准确，而在精加工阶段中也经常需要安排某些钻孔之类的粗加工工序。

2.6.3　工序顺序的安排

零件上的全部加工表面应安排在一个合理的加工顺序中加工，这对保证零件质量、提高生产率、降低加工成本都至关重要。

1. 机械加工工序的安排原则

（1）基准先行

先把基准面加工出来，再以基准面定位来加工其他表面，以保证加工质量。

（2）先粗后精

粗加工在前，精加工在后，粗、精分开。

（3）先主后次

先加工主要面再加工次要面，如主要表面是指装配表面、工作表面，次要表面是指键槽、连接用的光孔等。

（4）先面后孔

对于箱体、支架和连杆等工件，应先加工平面后加工孔，这是因为平面轮廓尺寸较大，平面定位安装稳定，通常均以平面定位来加工孔，以便于保证平面和孔的位置精度。

2. 热处理工序及表面处理工序的安排

根据热处理的目的，安排热处理在加工过程中的位置。

（1）退火

将钢加热到一定的温度，保温一段时间，随后由炉中缓慢冷却的一种热处理工序。其作用是：消除内应力，提高强度和韧性，降低硬度，改善切削加工性。例如高碳钢采用退火，放在粗加工前，毛坯制造出来以后，以降低硬度，改善切削加工性能。

（2）正火

将钢加热到一定温度，保温一段时间后从炉中取出，在空气中冷却的一种热处理工序。其作用是：提高钢的强度和硬度，使工件具有合适的硬度，改善切削加工性。例如低碳钢采用正火，放在粗加工前，毛坯制造出来以后，以提高硬度。

（3）回火

将淬火后的钢加热到一定的温度，保温一段时间，然后置于空气或水中冷却的一种热处理的方法。其作用是：稳定组织、消除内应力、降低脆性。

(4) 调质处理

其作用是获得细致均匀的组织，提高零件的综合机械性能。例如中碳钢和合金钢安排在粗加工后，半精加工前，以提高零件的综合机械性能。

(5) 时效处理

其作用是消除毛坯制造和机械加工中产生的内应力。一般安排在毛坯制造出来和粗加工后，常用于大而复杂的铸件。

(6) 淬火

将钢加热到一定的温度，保温一段时间，然后在冷却介质中迅速冷却，以获得高硬度组织的一种热处理工艺。其作用是提高零件的硬度，一般安排在磨削前。

(7) 渗碳处理

其作用是提高工件表面的硬度和耐磨性，可安排在半精加工之前或之后进行。

(8) 表面处理

为提高工件表面耐磨性、耐蚀性安排的热处理工序以及以装饰为目的而安排的热处理工序，例如镀铬、镀锌等，一般都安排在工艺过程最后阶段进行。

3. 检验工序的安排

为保证零件制造质量，防止产生废品，检验工序是保证产品质量合格的关键工序之一。每个操作工人在操作过程中和操作结束后都必须自检。在工艺规程中，在下列情况下应安排检验工序：

1) 粗加工全部结束之后；

2) 送往外车间加工的前后；

3) 工时较长和重要工序的前后；

4) 最终加工之后。

4. 其他工序的安排

除了安排几何尺寸检验工序之外，有的零件还要安排探伤、密封、称重、平衡等检验工序。X射线检查、超声波探伤检查等多用于工件（毛坯）内部的质量检查，一般安排在工艺过程的开始。磁力探伤、荧光检验主要用于工件表面质量的检验，通常安排在精加工的前后进行。密封性检验、零件的平衡、零件的重要检验一般安排在工艺过程的最后阶段进行。零件表层或内腔毛刺对机器装配质量影响甚大，切削加工之后，应安排去毛刺工序。零件在进入装配之前，一般都应安排清洗工序。工件内孔、箱体内腔易存留切屑，研磨、珩磨等光整加工工序之后，微小磨粒易附着在工件表面上，要注意清洗。在用磁力夹紧工件的工序之后，要安排去磁工序，不让带有剩磁的工件进入装配线。

2.6.4 工序的集中与分散

工序集中与工序分散，是拟定工艺路线时确定工序数目或工序内容多少的两种不同的原则，它和设备类型的选择有密切的关系。

工序集中，是在一个工序中包含尽可能多的工步内容。在批量较大时，常采用多轴、多面、多工位机床和复合刀具来实现工序集中，从而有效地提高生产率。多品种、中小批量生产中越来越多地使用加工中心机床，便是一个工序集中的典型例子。

工序分散与上述情况相反，整个工艺过程的工序数目较多，工艺路线较长，而每道工序

所完成的工步内容较少，最少时一个工序仅一个工步。

1. 工序集中原则

按工序集中原则组织工艺过程，就是使每个工序所包括的加工内容尽量多些，将许多工序组成一个集中工序。最大限度的工序集中，就是在一个工序内完成工件所有表面的加工。例如采用数控机床、加工中心按工序集中原则组织工艺过程，生产适应性反而好，转产相对容易，虽然设备的一次性投资较高，但由于有足够的柔性，仍然受到愈来愈多的重视。

2. 工序分散原则

按工序分散原则组织工艺过程，就是使每个工序所包括的加工内容尽量少些。最大限度的工序分散，就是每个工序只包括一个简单工步。例如传统的流水线、自动线生产基本是按工序分散原则组织工艺过程的，这种组织方式可以实现高生产率生产，但对产品改型的适应性较差，转产比较困难。

2.7 加工工序的设计

2.7.1 机床与工艺装备的选择

1. 机床的选择

在拟定工艺路线时，确定了各工序所用机床的类型、是否需要设计专用机床等。

在具体确定机床型号时，还必须考虑以下基本原则：

1）机床的加工规格范围应与零件的外部形状、尺寸相适应。

2）机床的精度应与工序要求的加工精度相适应。

3）机床的生产效率应与工件的生产类型相适应。一般单件小批生产宜选用通用机床，大批大量生产宜选用高生产率的专用机床、组合机床或自动机床。

4）采用数控机床加工的可能性。在中小批生产类型中，对于一些精度要求较高、工步内容较多的复杂工序，应尽量考虑采用数控机床加工。

5）机床的选择应与现有生产条件相适应。选择机床应当尽量考虑到现有的生产条件，除了新厂投产以外，原则上应尽量发挥原有设备的作用，并尽量使设备负荷平衡。

各种机床的规格和技术性能可查阅有关的手册或机床说明书。

2. 工艺装备的选择

工艺装备主要包括夹具、刀具和量具，其选择原则如下所述。

（1）夹具的选择

在单件小批生产中，应尽量选用通用夹具或组合夹具。在大批大量生产中，则应根据加工要求设计制造专用夹具。

（2）刀具的选用

合理地选用刀具，是保证产品质量和提高切削效率的重要条件。在选择刀具形式和结构时，应考虑以下主要因素：

1）生产类型和生产量。单件小批生产时，一般尽量选用标准刀具，大批大量生产中广泛采用专用刀具、复合刀具等，以获得高的生产率。

2）工艺方案和机床类型。不同的工艺方案，必然要选用不同类型的刀具。例如孔的加工，可以采用钻—扩—铰，也可以采用钻—粗镗—精镗等，显然所选用的刀具类型是不同的。

3）机床的类型、结构和性能对刀具的选择也有重要的影响。例如立式铣床加工平面一般选用立铣刀或面铣刀，而不会用圆柱铣刀等。

4）工件的材料、形状、尺寸和加工要求。刀具的类型确定以后，根据工件的材料和加工性质确定刀具的材料。工件的形状和尺寸有时将影响刀具结构及尺寸，例如一些特殊表面（如T形槽）的加工，就必须选用特殊的刀具（如T形槽铣刀）。此外，所选的刀具类型、结构及精度等级必须与工件的加工要求相适应，如粗铣时应选用粗齿铣刀，而精铣时则选用细齿铣刀等。

（3）量具的选择

在选择量具前首先要确定各工序加工要求如何进行检测。工件的形位精度要求一般是依靠机床和夹具的精度而直接获得的，操作工人通常只检测工件的尺寸精度和部分形位精度，而表面粗糙度一般是在该表面的最终加工工序用目测方法来检验。但在专门安排的检验工序中，必须根据检验卡片的规定，借助测量仪器和其他的检测手段全面检测工件的各项加工要求。

选择量具时应使量具的精度与工件加工精度相适应，量具的量程与工件的被测尺寸大小相适应，量具的类型与被测要素的性质（孔或外圆的尺寸值还是形状位置误差值）和生产类型相适应。一般来说，单件小批生产广泛采用游标卡尺、千分尺等通用量具，大批大量生产则采用极限量规和高效专用量仪等。

各种通用量具的使用范围和用途，可查阅有关的专业书籍或技术资料，并以此作为选择量具时的参考依据。

当需要设计专用设备或专用工艺装备时，应依据工艺要求提出专用设备或专用工装设计任务书。设计任务书是一种指示性文件，其上应包括与加工工序内容有关的必要参数、所要求的生产率、保证产品质量的技术条件等内容，作为设计专用设备或专用工艺装备的依据。

2.7.2 加工余量的确定

工艺路线拟定之后要进行工序设计，确定各工序的具体内容。由于工序尺寸的确定不仅与工件设计尺寸有关，还与各工序的加工余量有密切的关系，所以先介绍有关加工余量的概念，然后分析基准重合时工序尺寸及其公差的确定方法。

1. 加工余量的概念

为了保证零件的质量（精度和粗糙度值），在加工过程中，需要从工件表面上切除的金属层厚度，称为加工余量。加工余量又有加工总余量和工序余量之分。加工总余量是指某一表面毛坯尺寸与零件设计尺寸之差，以 Z_0 表示。工序余量是指该表面加工相邻两工序尺寸之差，以 Z_i 表示。总余量 Z_0 与工序余量 Z_i 的关系可用下式表示：

$$Z_0 = \sum_{i=1}^{n} Z_i \tag{2.1}$$

式中，n 为某一表面所经历的工序数。

工序余量有单边余量和双边余量之分。非对称结构的非对称表面的加工余量，称为单边

余量，比如平面的加工余量，用 Z_b 表示。

$$Z_b = L_a - L_b \tag{2.2}$$

式中　Z_b——本工序的工序余量；

L_a——上工序的基本尺寸；

L_b——本工序的基本尺寸。

对称结构的对称表面（外圆与内孔等回转表面）的加工余量，称为双边余量。对于外圆与内孔这样的对称表面，其加工余量用双边余量 $2Z_b$ 表示。

对于外圆表面有

$$2Z_b = D_a - D_b \tag{2.3}$$

对于内圆表面有

$$2Z_b = d_b - d_a \tag{2.4}$$

由于工序尺寸有偏差，故各工序实际切除的余量值是变化的，因此，工序余量有公称余量（简称余量）、最大余量 Z_{max}、最小余量 Z_{min}之分。

对于如图 2-16 所示加工余量及公差，由图可知公称余量的变动范围为

$$T_Z = Z_{max} - Z_{min} = T_b + T_a \tag{2.5}$$

式中　T_b——本工序工序尺寸公差；

T_a——上工序工序尺寸公差。

工序尺寸公差一般按“入体原则”标注。对被包容尺寸（轴径），上偏差为 0，其最大尺寸就是基本尺寸；对包容尺寸（孔径、键槽），下偏差为 0，其最小尺寸就是基本尺寸。而孔距和毛坯尺寸公差带常取对称公差带标注。

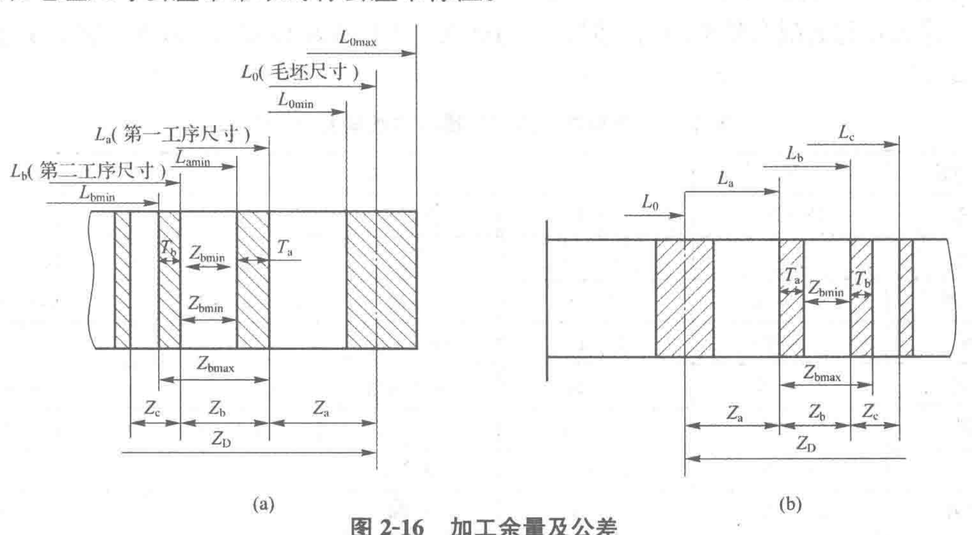


图 2-16　加工余量及公差

(a) 被包容面加工余量及公差；(b) 包容面加工余量及公差

2. 影响加工余量的因素

加工余量的大小对于工件的加工质量和生产率均有较大的影响。加工余量过大，不仅增加机械加工的劳动量，降低了生产率，而且增加材料、工具和电力的消耗，提高了加工成本。若加工余量过小，则既不能消除上工序的各种表面缺陷和误差，又不能补偿本工序加工时工件的装夹误差，易造成废品。因此，应合理地确定加工余量。确定加工余量的基本原则

是在保证加工质量的前提下越小越好。

(1) 上道工序的表面粗糙度值 R_a 和表面缺陷层深度 D_a

本工序必须把上工序留下的表面粗糙度值 R_a 全部切除，还应切除上工序在表面留下的一层金属组织已遭破坏的表面缺陷层 D_a，如图 2-17 所示，各种加工方法所得实验数据见表 2-10。

(2) 上工序的尺寸公差 T_a

包括几何形状误差，如锥度、椭圆度、平面度等，其大小可根据选用的加工方法所能达到的经济精度，查阅工艺手册确定。

(3) 上道工序各表面相互位置空间偏差 ρ_a

ρ_a 是指不由尺寸公差 T_a 所控制的形位误差，包括轴线的直线度、位移和平行度；轴线与表面的垂直度；阶梯轴内外圆的同轴度；平面的平面度等。

ρ_a 的数值与上工序的加工方法和零件的结构有关，可用近似计算法或查有关资料确定。若存在两种以上的空间偏差时，可用向量和表示。

(4) 本工序的装夹误差 $\Delta\varepsilon_b$

装夹误差不仅包括定位和夹紧误差，若用夹具装夹，还包括夹具本身的制造误差，其大小为三者的向量和。这些误差会使工件在加工时的位置发生偏移，所以加工余量还必须考虑装夹误差的影响。如图 2-18 所示，用三爪自定心卡盘夹持工件外圆磨削孔时，由于三爪自定心卡盘定心不准，使工件轴线偏离主轴旋转轴线 e 值，造成孔的磨削余量不均匀。因此，为确保上工序各项误差和缺陷的切除，孔的直径应增加 $2e$。

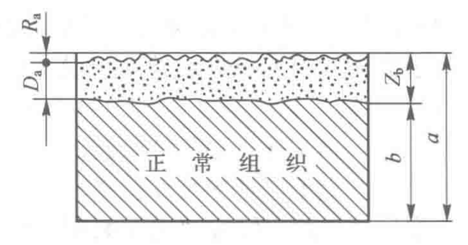


图 2-17 表面粗糙度值 R_a 和表面缺陷层深度 D_a

表 2-10 各种加工方法所得实验数据 R_a 和 D_a

加工方法	R_a	D_a	加工方法	R_a	D_a
粗车	15～100	40～60	精扩孔	25～100	30～40
精车	5～45	30～40	粗铰	25～100	25～30
磨外圆	1.7～15	15～25	精铰	8.5～25	10～20
钻	45～225	40～60	粗车端面	15～225	40～60
扩钻	25～225	35～60	精车端面	5～54	30～40
粗镗	25～225	30～50	磨端面	1.7～15	15～35
精镗	5～25	25～40	磨内圆	1.7～15	20～30
粗扩孔	25～225	40～60	拉削	1.7～8.5	10～20
粗刨	15～100	40～50	磨平面	1.7～15	20～30
粗插	25～100	50～60	切断	45～225	60
精刨	5～45	25～40	研磨	0～1.6	3～5
精插	5～45	35～50	超级光磨	0～0.8	0.2～0.3
粗铣	15～225	40～60	抛光	0.06～1.6	2～5
精铣	5～45	25～40			

装夹误差的数值，可通过先分别求出定位误差、夹紧误差和夹具的装夹误差后再相加而得。ε_b 也具有矢量性质。

综上所述，加工余量的基本公式为

$$Z_b = T_a + R_a + D_a + |\rho_a + \varepsilon_b| \text{（单边余量）} \tag{2.6}$$

$$2Z_b = T_a + 2(R_a + D_a) + 2|\rho_a + \varepsilon_b| \text{（双边余量）} \tag{2.7}$$

在应用上述公式时，要结合具体情况进行修正。例如在无心磨床上加工小轴或用浮动绞刀、浮动镗刀和拉刀加工孔时，都是采用自为基准原则，不计装夹误差 $\Delta\varepsilon_b$，形位误差 ρ_a 中仅剩形状误差，不计位置误差，故公式为

$$2Z_b = T_a + 2(R_a + D_a) + 2\rho_a \tag{2.8}$$

对于研磨、珩磨、超精磨和抛光等光整加工，若主要是为了改善表面粗糙度，则公式为

$$2Z_b = 2R_a \tag{2.9}$$

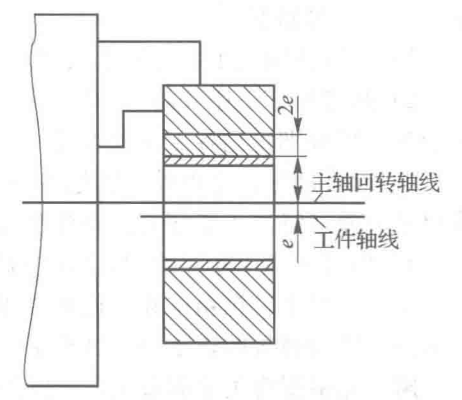


图 2-18 三爪自定心卡盘装夹误差对加工余量的影响

3. 加工余量的确定方法

确定加工余量的方法有 3 种：经验法、查表法和计算法

（1）经验法

由一些有经验的工程技术人员或工人根据经验确定加工余量的大小。由经验法确定的加工余量往往偏大，这主要是因为主观上怕出废品的缘故，这种方法一般用于单件小批生产。

（2）查表法

各工厂广泛采用查表法，此法主要以工厂生产实践和实验研究积累的经验所制成的表格为基础，并结合工厂的实际情况进行适当修改后确定。这种方法方便、迅速，生产上应用较多。

（3）计算法

在影响因素清楚的情况下，计算法是比较准确的。要做到对余量影响因素清楚，必须具备一定的测量手段和掌握必要的统计分析资料。在掌握了各种误差因素大小的前提下，才能进行余量比较准确的计算。

注意：在确定加工余量时，要分别确定加工总余量和工序余量。加工总余量的大小与所选择的毛坯制造精度有关。用查表法确定工序余量时，粗加工工序余量不能用查表法得到，而是总余量减去其他各工序余量而得。

2.7.3 工序尺寸与公差的确定

由于工序尺寸是零件在加工过程中各工序应保证的加工尺寸，因此，正确地确定工序尺寸及其公差，是制定工艺规程的一项重要工作。

工序尺寸的计算要根据零件图上的设计尺寸，已确定的各工序的加工余量及定位基准的转换关系来进行。工序尺寸公差则按各工序加工方法的经济精度选定。工序尺寸及偏差标注在各工序的工序简图上，作为加工和检验的依据。

当基准不重合时，或零件在加工过程中需要多次转换工序基准时，或工序尺寸尚需从继

续加工的表面标注时，工序尺寸的计算是比较复杂的，需要应用尺寸链原理进行分析和计算，所以这一部分内容放在“工艺尺寸链的计算”一节中讲述，这里不作介绍。

对于各工序的定位基准与设计基准重合时的表面的多次加工，其工序尺寸的计算比较简单，此时只要根据零件图上的设计尺寸、各工序的加工余量、各工序所能达到的精度，由最后一道工序开始依次向前推算，直至毛坯为止，就可将各个工序的工序尺寸及其公差确定出来。具体步骤如下：

1）确定各加工工序的加工余量；

2）从终加工工序开始，即从设计尺寸开始，到第一道加工工序，逐次加上每道加工工序余量，可分别得到各工序基本尺寸（包括毛坯尺寸）；

3）除终加工工序以外，其他各加工工序按各自所采用加工方法的加工经济精度确定工序尺寸公差（终加工工序的公差按设计要求确定）；

4）填写工序尺寸并按“入体原则”标注工序尺寸公差。

例如：某主轴箱箱体孔，设计要求是 ϕ100Js6，R_a=0.8μm，加工工序为粗镗—半精镗—精镗—浮动镗等四道工序，试确定工序尺寸和公差。

解：先根据有关手册及工厂实际经验确定各工序的余量，再根据各种加工方法的经济精度表格确定各工序尺寸的公差，最后由后工序向前工序逐个计算工序尺寸，详见表 2-11。

表 2-11　主轴孔各工序的工序尺寸及其公差的计算实例

工序名称	工序余量	工序的经济精度	工序尺寸	工序尺寸及其公差和 R_a
浮动镗	0.1	Js6（±0.011）	100	$\phi100\pm0.011$　R_a=0.8μm
精镗	0.5	H7（+0.0350）	100−0.1=99.9	$\phi99.9_{0}^{+0.035}$　R_a=1.6μm
半精镗	2.4	H10（+0.140）	99.9−0.5=99.4	$\phi99.4_{0}^{+0.14}$　R_a=3.2μm
粗镗	5	H13（+0.510）	99.4−2.4=97	$\phi97_{0}^{+0.51}$　R_a=6.4μm
毛坯孔	8	（±1.3）	97−5=92	$\Phi92\pm1.3$

2.7.4　工艺尺寸链的计算

零件图上所标注的尺寸公差是零件加工最终所要求达到的尺寸要求，工艺过程中许多中间工序的尺寸公差，必须在设计工艺过程中予以确定。工序尺寸及其公差一般都是通过解算工艺尺寸链确定的，为掌握工艺尺寸链计算规律，这里先介绍尺寸链的概念及尺寸链计算方法。

1. 尺寸链的基本概念

（1）尺寸链的定义

在工件加工和机器装配过程中，由相互联系的尺寸，按一定顺序排列成的封闭尺寸组，称为尺寸链。

图 2-19 所示工件如先以 1 面定位加工 2 面，得尺寸 A_1，然后再以 1 面定位用调整法加工台阶面 3，得尺寸 A_2，要求保证 2 面与 3 面间尺寸 A_0；A_1，A_2 和 A_0 这三个尺寸构成了一个封闭尺寸组，就成了一个尺寸链。

（2）工艺尺寸链的组成

环：工艺尺寸链中的每一个尺寸称为尺寸链的环。工艺尺寸链由一系列的环组成。环又分为：

封闭环：在加工过程中间接获得的尺寸，称为封闭环。在图 2-19（b）所示尺寸链中，A_0 是间接得到的尺寸，它就是图（b）所示尺寸链的封闭环。

组成环：在加工过程中直接获得的尺寸，称为组成环。尺寸链中 A_1 与 A_2 都是通过加工直接得到的尺寸，A_1 与 A_2 都是尺寸链的组成环。

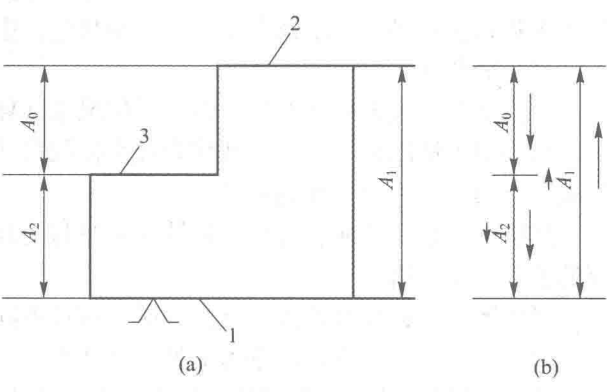


图 2-19 零件加工过程中的尺寸链

（a）台阶零件；（b）尺寸链图

组成环按其对封闭环的影响又可分为增环和减环。

增环：在尺寸链中，自身增大或减小，会使封闭环随之增大或减小的组成环，称为增环。增环在字母上面添加→或用 A_z 表示。

减环：在尺寸链中，自身增大或减小，会使封闭环反而随之减小或增大的组成环，称为减环。减环在字母上面添加←或用 A_j 表示。

增减环的确定：用箭头方法确定，即凡是箭头方向与封闭环箭头方向相反的组成环为增环，相同的组成环为减环。在图 2-19（b）所示尺寸链中，A_1 是增环，A_2 是减环。

传递系数 ξ_i：表示组成环对封闭环影响大小的系数。即组成环在封闭环上引起的变动量与组成环本身变动量之比。对直线尺寸链而言，增环的 $\xi_i=1$，减环的 $\xi_i=-1$。

（3）尺寸链的分类

1）按尺寸链在空间分布的位置关系，可分为线性尺寸链、平面尺寸链和空间尺寸链。

线性尺寸链：尺寸链中各环位于同一平面内且彼此平行。

平面尺寸链：尺寸链中各环位于同一平面或彼此平行的平面内，各环之间可以不平行。

空间尺寸链：尺寸链中各环不在同一平面或彼此平行的平面内。

2）按尺寸链的应用范围，可分为工艺尺寸链和装配尺寸链。

工艺尺寸链：在加工过程中，工件上各相关的工艺尺寸所组成的尺寸链。

装配尺寸链：在机器设计和装配过程中，各相关的零部件相互联系的尺寸所组成的尺寸链。

3）按尺寸链各环的几何特征，可分为长度尺寸链和角度尺寸链。

长度尺寸链：尺寸链中各环均为长度量。

角度尺寸链：尺寸链中各环均为角度量。

4）按尺寸链之间相互关系，可分为独立尺寸链和并联尺寸链。

独立尺寸链：尺寸链中所有的组成环和封闭环只从属于一个尺寸链。

并联尺寸链：两个或两个以上的尺寸链，通过公共环将它们联系起来并联形成的尺寸链。

2. 尺寸链的计算方法

计算尺寸链有以下两种方法。

（1）概率法

概率法是指应用概率论理论来进行尺寸链计算的方法。此法能克服极值法的缺点，主要用于环数较多的场合，以及大批大量自动化生产中。

（2）极值法

极值法是按误差综合的两种最不利情况来计算封闭环极限尺寸的方法，这也就是说，各增环均为最大极限尺寸而各减环均为最小极限尺寸的情况，以及各增环均为最小极限尺寸而各减环均为最大极限尺寸的情况。

此法的优点是简便、可靠，其缺点是当封闭环公差较小、组成环数目较多时，将使组成环的公差过于严格。

尺寸链的各种计算公式，就是按照这两种不同的计算方法分别推导出来的。

尺寸链的各种计算可以分为下列 3 种情况：

1）已知组成环，求封闭环。根据各组成环基本尺寸及公差（或偏差），来计算封闭环的基本尺寸及公差（或偏差），称为尺寸链的正计算。正计算主要用于审核图样，验证设计的正确性，以及校核零件加工后能否满足零件的技术要求。正计算的结果是唯一的。

2）已知封闭环，求组成环。根据设计要求的封闭环基本尺寸、公差（或偏差）以及各组成环的基本尺寸，反过来计算各组成环的公差（或偏差），称为尺寸链的反计算。反计算一般常用于产品设计、加工和装配工艺计算等方面。反计算的解不是唯一的。如何将封闭环的公差正确地分配各组成环，这里有一个优化问题。

3）已知封闭环及部分组成环，求其余组成环。根据封闭环和其他组成环的基本尺寸及公差（或偏差），来计算尺寸链中其余的一个或几个组成环的基本尺寸及公差（或偏差），称为尺寸链的中间计算。中间计算在工艺设计上应用较多，如基准的换算、工序尺寸的确定等。其解可能是唯一的，也可能是不唯一的。

3. 尺寸链的计算公式

尺寸链计算有极值法与统计法（或概率法）两种。用极值法解尺寸链是从尺寸链各环均处于极值条件来求解封闭环尺寸与组成环尺寸之间关系的。用统计法解尺寸链则是运用概率论理论来求解封闭环尺寸与组成环尺寸之间关系的。我们只研究极值法解尺寸链的计算公式。

机械制造中的尺寸公差通常用基本尺寸（A）、上偏差（ES）、下偏差（EI）表示，还可以用最大极限尺寸（A_{max}）与最小极限尺寸（A_{min}）或基本尺寸（A）、中间偏差（Δ）与公差（T）表示。

1）封闭环基本尺寸 A_0 等于所有增环基本尺寸（A_z）之和减去所有减环基本尺寸（A_j）之和，即

$$A_0 = \sum_{i=1}^{m} \overrightarrow{A}_i - \sum_{i=1}^{n} \overleftarrow{A}_i \tag{2.10}$$

式中 m——增环数；

n——减环数。

2）封闭环极限尺寸：

$$A_{0max} = \sum_{i=1}^{m} \overrightarrow{A}_{imax} - \sum_{i=1}^{n} \overleftarrow{A}_{imin} \tag{2.11}$$

结论：封闭环的最大值等于所有增环的最大值之和减去所有减环最小值之和。

$$A_{0\min}=\sum_{i=1}^{m}\overrightarrow{A}_{i\min}-\sum_{i=1}^{n}\overleftarrow{A}_{i\max} \tag{2.12}$$

结论：封闭环的最小值等于所有增环的最小值之和减去所有减环最大值之和。

3）封闭环极限偏差：

$$ESA_0=\sum_{i=1}^{m}ES\overrightarrow{A}_i-\sum_{i=1}^{n}EI\overleftarrow{A}_i \tag{2.13}$$

结论：封闭环的上偏差等于所有增环的上偏差之和减去所有减环下偏差之和。

$$EIA_0=\sum_{i=1}^{m}EI\overrightarrow{A}_i-\sum_{i=1}^{n}ES\overleftarrow{A}_i \tag{2.14}$$

结论：封闭环的下偏差等于所有增环的下偏差之和减去所有减环上偏差之和。

竖式计算法口诀：封闭环、增环的基本尺寸和上下偏差照抄；减环基本尺寸变号；减环上下偏差对调且变号。竖式计算法可用来验算极值法解尺寸链的正确与否，见表 2-12。

表 2-12 计算封闭环的竖式表

列号	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
名称	基本尺寸	上偏差	下偏差	公差
代号 / 环的名称	A	ES	EI	T
增环	$\sum_{i=1}^{m}\overrightarrow{A}_i$	$\sum_{i=1}^{m}ES\overrightarrow{A}_i$	$\sum_{i=1}^{m}EI\overrightarrow{A}_i$	$\sum_{i=1}^{m}T\overrightarrow{A}_i$
减环	$-\sum_{i=1}^{n}\overleftarrow{A}_i$	$-\sum_{i=1}^{n}EI\overleftarrow{A}_i$	$-\sum_{i=1}^{n}ES\overleftarrow{A}_i$	$\sum_{i=1}^{n}T\overleftarrow{A}_i$
封闭环	A_0	ESA_0	EIA_0	TA_0

4. 工艺尺寸链的应用

（1）测量基准与设计基准不重合时工序尺寸及其公差的计算

在加工中，有时会遇到某些加工表面的设计尺寸不便测量，甚至无法测量的情况，为此需要在工件上另选一个容易测量的测量基准，通过对该测量尺寸的控制来间接保证原设计尺寸的精度。这就产生了测量基准与设计基准不重合时，测量尺寸及公差的计算问题。

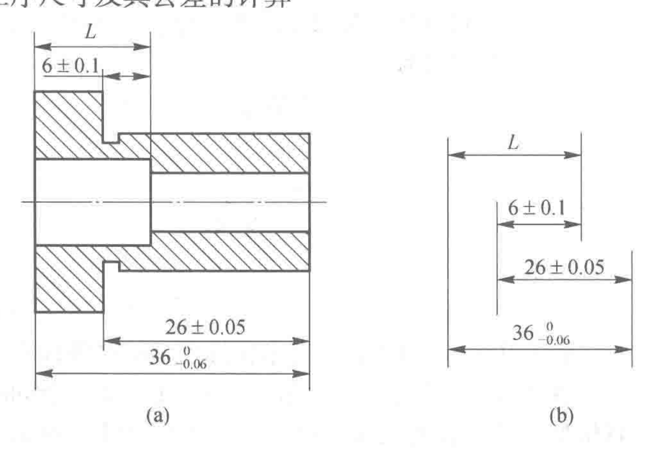


图 2-20 测量基准与设计基准不重合的尺寸换算

例：如图 2-20 所示零件，加工时要求保证尺寸 6±0.1mm，但该尺寸不便测量，只好通过测量尺寸 L 来间接保证，试求工序尺寸 L 及其上、下偏差。

解： 在图 2-20（a）中尺寸 6±0.1mm 是间接得到的，即为封闭环。工艺尺寸链图如图 2-20（b）所示，其中尺寸 L=26±0.05mm 为增环，尺寸 $36^{0}_{-0.05}$ mm 为减环。

增环	L	ESL	EIL
	26	+0.05	−0.05
减环	−36	−(−0.05)	0
封闭环	6	+0.1	−0.1

因此得

$$L=16^{0}_{-0.05}\text{mm}$$

(2) 定位基准与设计基准不重合时工序尺寸的计算

在零件加工过程中有时为方便定位或加工，选用不是设计基准的几何要素作定位基准，在这种定位基准与设计基准不重合的情况下，需要通过尺寸换算，改注有关工序尺寸及公差，并按换算后的工序尺寸及公差加工，以保证零件的原设计要求。

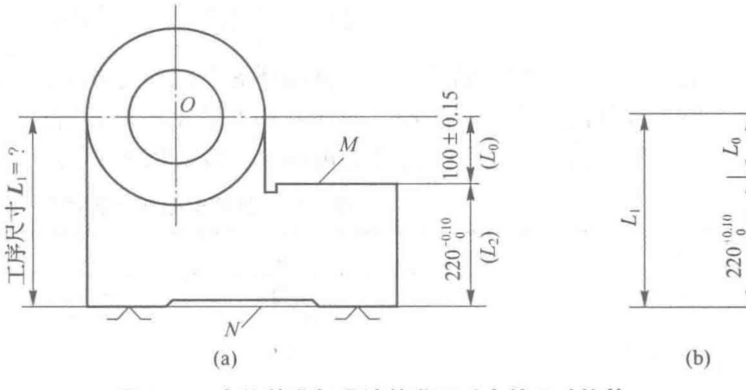


图 2-21 定位基准与设计基准不重合的尺寸换算

例：如图 2-21 (a) 所示零件以底面 N 为定位基准镗 O 孔，确定 O 孔位置的设计基准是 M 面（设计尺寸为 100±0.15mm)，用镗夹具镗孔时，镗杆相对于定位基准 N 的位置（即 L_1 尺寸）预先由夹具确定。这时设计尺寸 L_0 是在 L_1，L_2 尺寸确定后间接得到的。问如何确定 L_1 尺寸及公差，才能使间接获得的 L_0 尺寸在规定的公差范围之内？

解： 1) 根据题意可看出尺寸 100±0.15mm 是封闭环。

2) 工艺尺寸链如图 2-21 (b) 所示，其中尺寸 $220^{+0.10}_{0}$ 为减环，L 为增环。

3) 按公式计算得

增环	L	ESL	EIL
减环	−220	0	−(+0.1)
封闭环	100	+0.15	−0.15

因此

$$L=320^{+0.15}_{-0.05}\text{mm}$$

(3) 中间工序的工序尺寸及其公差的求解计算

在工件加工过程中，有时一个基面的加工会同时影响两个设计尺寸的数值。这时，需要直接保证其中公差要求较严的一个设计尺寸，而另一设计尺寸需由该工序前面的某一中间工序的合理工序尺寸间接保证。为此，需要对中间工序尺寸进行计算。

例：图 2-22 (a) 所示齿轮内孔，孔径设计尺寸为 $\phi40^{+0.06}_{0}$mm，键槽设计深度为 $43.2^{+0.36}_{0}$mm，内孔及键槽加工顺序为：

1) 镗内孔至 $\phi39.6^{+0.1}_{0}$mm；

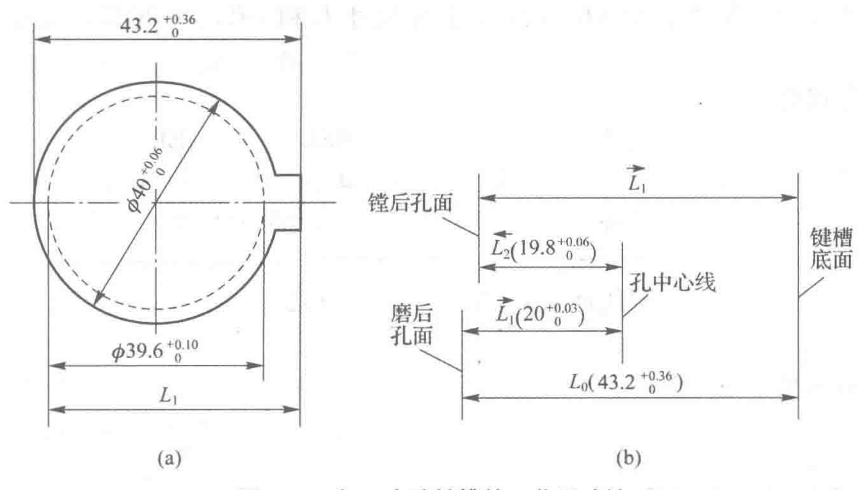


图 2-22 加工内孔键槽的工艺尺寸链

2）插键槽至尺寸 L_1；

3）淬火热处理；

4）磨内孔至设计尺寸 $\phi40_0^{+0.06}$mm，同时要求保证键槽深度为 $43.2_0^{+0.36}$mm。

试问：如何规定镗后的插键槽深度 L_1 值，才能最终保证得到合格产品？

解：

1）由加工过程可知，尺寸 $43.2_0^{+0.36}$mm 的一个尺寸界限——键槽底面，是在插槽工序时按尺寸 L_1 确定的；另一尺寸界限——孔表面，是在磨孔工序时由尺寸 $\phi40_0^{+0.06}$mm 确定的，故尺寸 $43.2_0^{+0.36}$mm 是一个间接得到的尺寸，为封闭环。

2）工艺尺寸链如图 2-22（b）所示，其中 L_1、尺寸 $\phi40_0^{+0.06}$ 为增环，尺寸 $\phi39.6_0^{+0.1}$ 为减环。

3）由公式计算得

增环	L	ESL	EIL
	40	+0.06	0
减环	−39.6	0	−(+0.1)
封闭环	43.2	+0.36	0

因此

$$L_1 = 43^{+0.33}_{+0.05}\text{mm}$$

（4）保证渗碳、渗氮层深度的工艺尺寸链计算

零件渗碳或渗氮后，表面一般要经磨削保证尺寸精度，同时要求磨后保留有规定的渗层深度。这就要求进行渗碳或渗氮热处理时按一定渗层深度及公差进行（用控制热处理时间保证），并对这一合理渗层深度及公差进行计算。

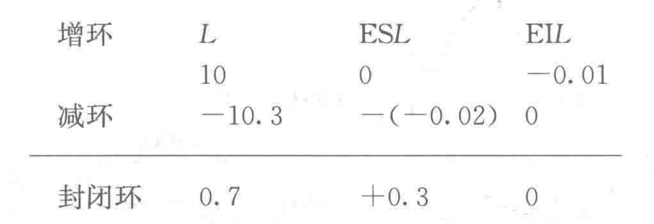
例：一批圆轴工件如图 2-23 所示，其加工过程为：车外圆至 $\phi20.6^0_{-0.04}$mm；渗碳淬火；磨外圆至 $\phi20^0_{-0.02}$mm。试计算保证磨后渗碳层深度为 0.7～1.0mm 时，渗碳工序的渗入深度及其公差。

解：

1）由题意可知，磨后保证的渗碳层深度 0.7～1.0mm 是间接获得的尺寸，为封闭环。

2）工艺尺寸链如图 2-23（b）所示，其中尺寸 L 和 $10^{0}_{-0.01}$ 为增环，尺寸 $10.3^{0}_{-0.02}$ 为减环。

3）由公式得



增环	L	ESL	EIL
	10	0	−0.01
减环	−10.3	−(−0.02)	0
封闭环	0.7	+0.3	0

因此

$L=1^{+0.28}_{+0.01}\text{mm}$

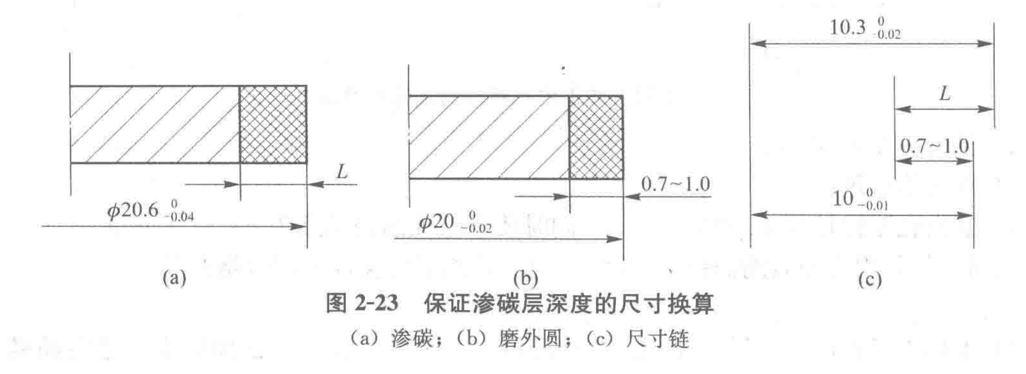


图 2-23　保证渗碳层深度的尺寸换算

（a）渗碳；（b）磨外圆；（c）尺寸链

2.8　工艺过程的技术经济分析

2.8.1　工艺过程的生产率

1. 时间定额

时间定额是指在一定生产条件（生产规模、生产技术和生产组织）下规定生产一件产品或完成一道工序所需消耗的时间。时间定额是安排作业计划、进行成本核算、确定设备数量、人员编制等的重要依据，因此时间定额是工艺规程的重要组成部分。

时间定额定得过紧，容易诱发忽视产品质量的倾向，或者会影响工人的主动性、创造性和经济性。时间定额定得过松就起不到指导生产和促进生产发展的积极作用。因此合理地制定时间定额对保证产品质量、提高劳动生产率、降低生产成本都是十分重要的。

时间定额的组成：时间定额由基本时间（T_j）、辅助时间（T_f）、布置工作地时间（T_w）、休息与生理需要时间（T_x）和准备与终结时间（T_z）组成。

1）基本时间 T_j：直接改变生产对象的尺寸、形状、相对位置以及表面状态或材料性能等工艺过程所消耗的时间，称为基本时间。对机加工而言，基本时间就是直接切除工序余量所消耗的机动时间。

机动时间可以通过计算的方法来确定。不同的加工面，不同的刀具或者不同的加工方式、方法，其计算公式不完全一样。但是计算公式中一般都包括有切入、切削加工和切出

时间。

如车削外圆时的基本时间 T_j 为

$$T_j=\frac{L_{计} Z}{n f a_p} \tag{2.15}$$

式中 $L_{计}$——工作行程计算长度，包括加工表面的长度、刀具切入和切出长度（mm）；

Z——工序单边余量（mm）；

n——工件的转速（mm）；

f——刀具的进给量（mm）；

a_p——背吃刀量（mm）。

各种不同情况下机动时间的计算公式可参考有关手册，针对具体情况予以确定。

2）辅助时间 T_f：各种辅助动作所消耗的时间，称为辅助时间。主要指装卸工件、开停机床、改变切削用量、测量工件尺寸、进退刀等动作所消耗的时间。确定辅助时间的方法主要有两种：①在大批大量生产中，可先将各辅助动作分解，然后查表确定各分解动作所需消耗的时间，并进行累加。②在中小批生产中，可按基本时间的百分比进行估算，并在实际中修改百分比，使之趋于合理。

3）操作时间：操作时间＝基本时间 T_j＋辅助时间 T_f。

4）服务时间 T_w（布置工作地时间）：为正常操作服务所消耗的时间，称为服务时间。主要指换刀、修整刀具、润滑机床、清理切屑、收拾工具等所消耗的时间。计算方法：一般按操作时间的 2%～7%进行计算。

5）休息时间 T_x：为恢复体力和满足生理卫生需要所消耗的时间，为休息时间。计算方法：一般按操作时间的 2%进行计算。

6）准备与终结时间 T_z：为生产一批零件，进行准备和结束工作所消耗的时间，称为准备与终结时间。主要指熟悉工艺文件、领取毛坯、安装夹具、调整机床、拆卸夹具等所消耗的时间。计算方法：根据经验进行估算。

其中：单件时间为

$$T_d=T_j+T_f+T_w+T_x$$

对于成批生产，单件计算时间为

$$T_h=T_j+T_f+T_w+T_x+T_z/n \tag{2.16}$$

式中，n——批工件的数量。

对于大量生产：

$$T_h=T_d$$

2. 时间定额的制定方法

合理的时间定额能调动工人的积极性，促进工人不断提高技术水平，对于保护产品质量、提高劳动生产率和降低生产成本都有很重要的作用，必须认真地、科学地加以制定。

制定时间定额的方法有以下几种：

1）由工时定额员、工艺人员和工人相结合，在总结过去经验的基础上，参考有关资料查表后估算确定。

2）以同类产品的时间定额为依据，进行对比分析后推算确定。

3）通过对实际操作时间的测定和分析确定。

随着企业生产技术条件的改善和技术发展，时间定额应定期进行修订，以不断保持定额的先进水平，进一步促进生产的发展。

3. 提高机械加工生产率的工艺措施

劳动生产率是衡量生产效率的一项综合性技术经济指标。它常用一个工人在单位劳动时间内制造出合格产品的数量来表示。提高劳动生产率的途径是多种多样的，如改进产品的结构设计、采用先进的毛坯制造方法和少无切屑加工工艺、采用各种工艺措施缩减时间定额以及改善生产组织和管理等。此处仅就提高劳动生产率的工艺措施做一简要介绍。

（1）缩短基本时间

1）提高切削用量。增大切削速度、进给量和背吃刀量都可以缩短基本时间，这是机械加工中广泛采用的提高生产率的有效方法。近年来国外出现了聚晶金钢石和聚晶立方氮化硼等新型刀具材料，切削普通钢材的速度可达 900m/min；加工 HRC60 以上的淬火钢、高镍合金钢，在 980℃时仍能保持其红硬性，切削速度可在 900m/min 以上。高速滚齿机的切削速度可达 65～75m/min，目前最高滚切速度已超过 300m/min。磨削方面，近年的发展趋势是在不影响加工精度的条件下，尽量采用强力磨削，提高金属切除率，磨削速度已超过 60m/s；而高速磨削速度已达到 180m/s 以上。

2）减少或重合切削行程长度。利用几把刀具或复合刀具对工件的同一表面或几个表面同时进行加工，或者利用宽刃刀具、成形刀具作横向进给同时加工多个表面，能减少每把刀的切削行程长度或使切削行程长度部分或全部重合，减少基本时间。

3）采用多件加工。多件加工可分顺序多件加工、平行多件加工和平行顺序多件加工 3 种形式。

顺序多件加工是指工件按进给方向一个接一个地顺序装夹，减少了刀具的切入、切出时间，即减少了基本时间。这种形式的加工常见于滚齿、插齿、龙门刨、平面磨和铣削加工中。

平行多件加工是指工件平行排列，一次进给可同时加工 n 个工件，加工所需基本时间和加工一个工件相同，所以分摊到每个工件的基本时间就减少到原来的 $1/n$，其中 n 为同时加工的工件数。这种方式常见于铣削和平面磨削中。

平行顺序多件加工是上述两种形式的综合，常用于工件较小、批量较大的情况，如立轴平面磨削和立轴铣削加工中。

（2）缩短辅助时间

缩短辅助时间的方法通常是使辅助操作实现机械化和自动化，或使辅助时间与基本时间重合。具体措施有：

1）采用先进高效的机床夹具。这不仅可以保证加工质量，而且大大减少了装卸和找正工件的时间。

2）采用多工位连续加工。即在批量和大量生产中，采用回转工作台和转位夹具，在不影响切削加工的情况下装卸工件，使辅助时间与基本时间重合。该方法在铣削平面和磨削平面中得到广泛的应用，可显著地提高生产率。

3）采用主动测量或数字显示自动测量装置。零件在加工中需多次停机测量，尤其是精密零件或重型零件更是如此，这样不仅降低了生产率，不易保证加工精度，还增加了工人的劳动强度，而主动测量的自动测量装置能在加工中测量工件的实际尺寸，并能用测量的结果

控制机床进行自动补偿调整。该方法在内、外圆磨床上被广泛采用，已取得了显著的效果。

4）采用两个相同夹具交替工作的方法。当一个夹具安装好工件进行加工时，另一个夹具同时进行工件装卸，这样也可以使辅助时间与基本时间重合。该方法常用于批量生产中。

（3）缩短布置工作场地时间

布置工作场地时间，主要消耗在更换刀具和调整刀具的工作上。因此，缩短布置工作场地时间主要是减少换刀次数、换刀时间和调整刀具的时间。减少换刀次数就是要提高刀具或砂轮的耐用度，而减少换刀和调刀时间是通过改进刀具的装夹和调整方法，采用对刀辅具来实现的。例如，采用各种机外对刀的快换刀夹具、专用对刀样板或样件以及自动换刀装置等。目前，在车削和铣削中已广泛采用机械夹固的可转位硬质合金刀片，既能减少换刀次数，又减少了刀具的装卸、对刀和刃磨时间，从而大大提高了生产效率。

（4）缩短与准备终结时间

准备与终结时间的多少，与工艺文件是否详尽清楚、工艺装备是否齐全、安装、调整是否方便有关。在进行工艺设计和工艺装备设计以及进行加工方法选择时应给予充分注意。在中小批生产中采用成组工艺和成组夹具，可明显缩短准备与终结时间，提高生产效率。

2.8.2　工艺方案的技术经济分析

编制某一零件的机械加工工艺规程时，一般可以有几种方案，它们都能达到零件图上规定的各项技术要求，但其生产成本却不相同。对工艺过程方案进行技术经济分析就是研究如何用最少的社会消耗、最低的成本生产出合格的产品，即通过比较各种不同工艺方案的生产成本，选出其中最为经济的加工方案。

工艺方案的技术经济分析可分为两种情况：一是对不同工艺方案进行工艺成本的分析和比较；二是按某些相对技术经济指标进行比较。

1. 生产成本

指制造一个零件或产品所必须的一切费用的总和。生产成本包括两部分费用：

1）工艺成本（第一类费用）：与完成工序直接有关的费用称为第一类费用，也称工艺成本。工艺成本占零件生产成本的70%～75%。工艺成本又可分为可变费用与不变费用两部分：

a. 可变费用V（元/件）：与零件年产量成比例的费用。它随产量的增长而增长。如材料和制造费、生产用电费等。

b. 不变费用C（元）：与产品年产量无直接关系的费用。当年产量在一定范围内变化时，全年的费用基本上保持不变。这类费用用S表示，它包括调整工人的工资、专用机床折旧费、专用机床修理费和专用夹具费等。

2）第二类费用：与完成工序无关而与整个车间的全部生产条件有关的费用，称为第二类费用。如非生产人员开支、厂房折旧及维护费、照明、取暖、通风费、运输费等。

2. 工艺方案的工艺成本比较

对各种工艺方案进行经济分析时，只要分析工艺成本即可，因为在同一生产条件下第二类费用基本上是相等的。

1）年度工艺成本$S_{年}$：

$$S_{年}=N_{零}V+C_{年}\ （元） \tag{2.17}$$

式中，$N_{零}$——零件的年生产纲领。

年度工艺成本 $S_{年}$ 与零件的年生产纲领 $N_{零}$ 成线性正比关系，如图 2-24 所示。

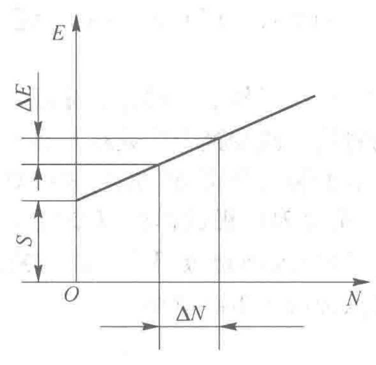


图 2-24　全年工艺成本图

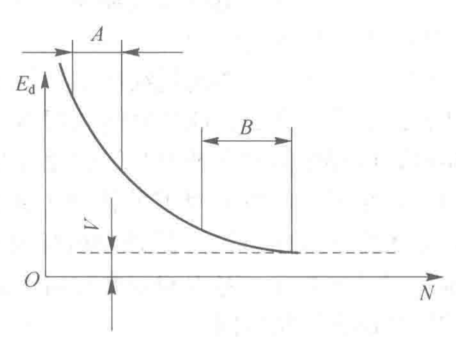


图 2-25　单件工艺成本

2）单件工艺成本 $S_{单}$：

$$S_{单}=V+C_{年}/N_{零}\ （元/件）$$

单件工艺成本 $S_{单}$ 与零件的年生产纲领 $N_{零}$ 成双曲线关系，如图 2-25 所示。

3. 工艺方案的经济性评定分析比较

工艺方案的技术经济分析有两种方法。其一是对几种工艺方案进行工艺成本的分析评比；其二是按照一些技术经济指标来进行宏观分析比较。

下面以两种不同的情况为例，说明分析比较其经济性的方法。

（1）基本投资或使用设备相同的情况

当被比较的工艺方案均采用现有设备，或基本投资相近时，常以全年工艺成本来作为比较的依据。

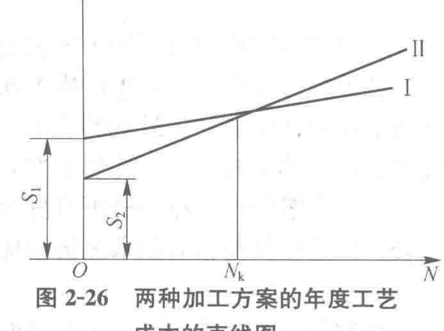


图 2-26　两种加工方案的年度工艺成本的直线图

设两种工艺方案的全年工艺成本分别为

$$S_1=V_1N+C_1 \tag{2.18}$$

$$S_2=V_1N+C_2 \tag{2.19}$$

如图 2-26 所示，两条直线交于 K 点，N_k 称为临界年产量。由式（2.18）和式（2.19）可得

$$N_k=\frac{C_1-C_2}{V_1-V_2} \tag{2.20}$$

当年产量 $N<N_k$ 时，方案Ⅱ较好；当 $N>N_k$ 时，方案Ⅰ较好。即当批量较小时，宜采用不变费用（图中 C_2）较小的方案；而在批量较大时，宜采用不变费用（图中 C_1）较大的方案，此时用于专用设备和工装的一次投资，分摊到每个零件上较少，而可变费用的减少（图中用直线的斜率表示）使得总的工艺成本降低。

（2）基本投资差额较大的情况

当两种方案的基本投资相差较大时，例如，第一方案采用了生产率较低但价格较便宜的机床和工艺装备，所以基本投资（K_1）小，但工艺成本（S_1）较高；第二方案采用了高生产率且价格较贵的机床及工艺装备，所以基本投资（K_2）大，但工艺成本（S_2）较小。也就是说，工艺成本的降低是由于增加基本投资而得到的。在这种情况下，单纯比较工艺成本是难以评定其经济性的，故必须考虑基本投资的经济效益，即不同方案的基本投资回收期。

所谓回收期，是指第二方案比第一方案多花费的投资，需要多长的时间方能由工艺成本的降低而收回。

回收期 τ，可用下式表示：

$$\tau=\frac{K_2-K_1}{S_1-S_2}=\frac{\Delta K}{\Delta S}\text{（年）} \tag{2.21}$$

式中　ΔK ——基本投资差额（元）；

　　ΔS ——全年工艺成本节约额（元/年）。

投资回收期必须满足以下要求：

1）小于设备或工艺设备的使用年限；

2）小于市场对该产品的需求年限；

3）小于国家规定的标准回收期，如夹具的标准回收期为 2～3 年，专用机床的标准回收期为 4～6 年。

2.9　项目实施

1. 任务分析

表 2-1 中的任务是编制阶梯轴的机械加工工艺过程卡和工序卡。该轴是个阶梯轴，其加工工艺具有普遍性，结构合理。工件材料为 45 钢，调质处理硬度为 55～60HRC，各尺寸精度、表面粗糙度等技术要求均在正常加工要求范围内。根据机械加工工艺规程的制定步骤即可完成本阶梯轴的工艺卡片的编制。

2. 实施过程

（1）分析零件的作用、结构和技术要求

本阶梯轴主要功用是传递动力和扭矩。主要表面结构是外圆面。本零件技术要求最高的尺寸精度（IT7）及表面粗糙度（R_a1.6）要求较高，具体表面处的技术要求如图 2-2 所示。

（2）确定毛坯种类

阶梯轴类零件的毛坯最常用的是圆棒料和锻件。本零件材料为 45 钢，结构简单、尺寸小，一般选择圆棒料。

一般阶梯轴类零件材料常选用 45 钢；对于中等精度而转速较高的轴可用 40Cr；对于高速、重载荷等条件下工作的轴可选用 20Cr，20CrMnTi 等低碳合金钢进行渗碳淬火，或用 38CrMoALA 氮化钢进行氮化处理。

（3）拟定工艺路线

在完成了对零件工艺分析后需要指定工艺路线。对于比较复杂的零件，应考虑几个加工方案，分析比较后确定比较合理的加工方案。

1）确定加工方法。传动轴大多是回转面，主要是采用车削和外圆磨削。轴类在进行外圆加工时，会因切除大量金属后引起残余应力重新分布而变形。应将粗精加工分开，先粗加工，再进行半精加工和精加工，精度要求高的表面最后进行磨削加工。其他外圆面采用粗车、半精车加工方案。

2）划分加工阶段。该轴加工划分为 3 个加工阶段，即粗车（粗车外圆、钻中心孔）、半精

车（半精车各处外圆、台肩和修研中心孔等）和粗精磨主要外圆。

3）选择定位基准。各工序的定位基准应根据粗、精基准选择原则合理选定。本零件各表面的设计基准一般是轴的中心线，其加工的定位基准，最常用的是中心孔。采用中心孔作为定位基准符合基准统一原则，可以在一次装夹中加工出多处外圆和端面，并能保证各外圆轴线的同轴度等精度要求。

4）加工工序安排。应遵循加工顺序安排的一般原则，例如先粗后精、先主后次等。

5）热处理工序安排。根据零件性能要求，合理安排预备热处理和最终热处理。调质处理安排在粗加工之后、半精加工之前。本零件要求调质处理达到55～60HRC，安排在粗加工之后，半精加工之前进行。

该轴的加工工艺路线为下料→车端面、钻中心孔→粗车→调质热处理→修研中心孔→半精车→粗磨→精磨→检验。

（4）确定工序尺寸

毛坯为圆棒料，一般在确定毛坯尺寸时可以通过确定加工余量得到毛坯尺寸，具体确定方法有分析计算法、经验估计法和查表修正法。

毛坯为锻件，一般可以通过查找相关机械加工工艺手册的图表进行确定。

①毛坯下料尺寸：$\phi42\times56$。

②粗车时，各外圆及各段尺寸按图纸加工尺寸均留余量3mm；半精车$\phi24\pm0.02$及$\phi38_{0}^{+0.025}$台阶车均留0.5mm余量。

（5）选择机床种类及工装、夹具、量具和所用到刀具

在保证加工质量的基础上选择经济合理的机床设备进行加工。如果是大批大量生产，则选用专用工装夹具和专用机床，单件小批生产则选择通过的工艺装备和设备。

（6）确定切削用量

在机床、刀具、加工余量等已确定的基础上，要求学生用公式计算1～2道工序的切削用量，其余各工序的切削用量可由切削用量手册中查得，具体的计算在后面的章节中介绍。

（7）填写机械加工工艺过程卡片

阶梯轴的机械加工工艺过程卡见表2-13。

表2-13　阶梯轴的机械加工工艺过程卡

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td colspan="3" rowspan="2">机械加工工艺过程卡片</td><td>产品型号</td><td colspan="2"></td><td>零件图号</td><td colspan="2"></td><td colspan="2">共1页</td></tr>
<tr><td>产品名称</td><td colspan="2"></td><td>零件名称</td><td colspan="2">阶梯轴</td><td colspan="2">第1页</td></tr>
<tr><td>材料牌号</td><td>45</td><td>毛坯种类</td><td>棒料</td><td>毛坯外形尺寸</td><td></td><td>每毛坯可制件数</td><td></td><td>每件台数</td><td></td><td>备注</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">序号</td><td rowspan="2">工序名称</td><td rowspan="2" colspan="3">工序内容</td><td rowspan="2">车间</td><td rowspan="2">工段</td><td rowspan="2">设备</td><td rowspan="2">刀具</td><td rowspan="2">夹具</td><td rowspan="2">量具</td><td colspan="2">工时</td></tr>
<tr><td>准终</td><td>单件</td></tr>
<tr><td>1</td><td>下料</td><td colspan="3">$\phi42\times56$</td><td>锻造</td><td>下料</td><td>锯床</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td>铣端面、钻中心孔</td><td colspan="3"></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

续表

序号	工序名称	工序内容	车间	工段	设备	刀具	夹具	量具	工时	
									准终	单件
2	粗车	1. 三爪卡盘夹持工件，车端面见平，钻中心孔 $\phi2.5$，用尾架顶尖顶住，粗车右端各部， 2. 调头，转夹工件，车端面保证总长 53，钻中心孔 $\phi2.5$，粗车外圆各部，留精加工余量 3mm	机加	车	CA6140	外圆车刀	三爪卡盘、顶尖	游标卡尺		
3	热处理	调质处理为 HRC55～60	热处理		箱式电阻炉		三爪卡盘			
4	钳	修研两端中心孔	机加	车	CA6140	硬质合金顶尖				
5	半精车	1. 夹左端，顶右端，精车右端各部，其中 $\phi24^{+0.03}_{-0.02}\times14$mm 处留磨削余量 0.5mm 2. 调头，一夹一顶精车另一端各部，其中 $\phi38_{0}^{+0.025}\times$ 6.5mm 留磨削余量 0.5mm	机加	车	CA6140	外圆车刀	三爪卡盘、顶尖	游标卡尺		
6	粗磨	1. 用两顶尖装夹工件，$\phi24^{+0.03}_{-0.02}\times14$mm 处留磨削余量 0.2mm 2. 调头，用两顶尖装夹工件，磨削 $\phi38_{0}^{+0.025}\times6.5$mm 留磨削余量 0.2mm	机加	磨	M1432A	砂轮	顶尖	外径千分尺		
7	精磨	用两顶尖装夹工件，$\phi24^{+0.03}_{-0.02}\times$ 14mm，$\phi38_{0}^{+0.025}$ $\times6.5$mm 处留磨削至图纸的技术要求	机加	磨	M1432A	砂轮	顶尖	外径千分尺		
8	检	检验								

										设计（日期）	校对（日期）	审核（日期）	标准化（日期）	会签（日期）
标记	处数	更改文件号	签字	日期	标记	处数	更改文件号	签字	日期					

2.10 拓展项目

1. 任务案例

如图 2-27 所示为某企业生产的阶梯轴的零件简图，年产 10 000 件，材料为 45 钢，热处理为 220～250HBS，为中批生产。

2. 任务要求

试编制其机械加工工艺规程。

3. 任务实施

(1) 分析零件的作用、结构和技术要求

本阶梯轴主要功用是传递动力和扭矩。主要表面结构是外圆面，次要结构表面为键槽。本零件技术要求最高的尺寸精度 (IT6) 及表面粗糙度 (R_a6.4)，具体表面处的技术要求如图 2-27 所示。

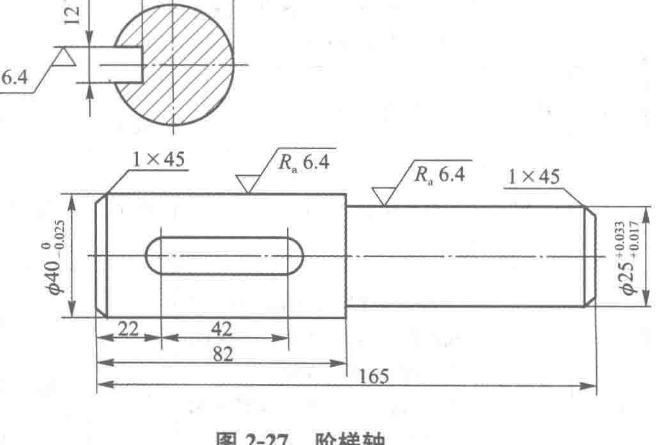


图 2-27 阶梯轴

(2) 确定毛坯种类

本零件材料为 45 钢，结构简单、尺寸小，选择圆棒料。

(3) 拟定工艺路线

在完成了对零件工艺分析后需要指定工艺路线。

1) 确定加工方法。传动轴大多是回转面，主要是采用车削和外圆磨削，另外还有键槽，一般选择铣削。轴类在进行外圆加工时，会因切除大量金属后引起残余应力重新分布而变形。应将粗、精加工分开，先粗加工，再进行半精加工和精加工，精度要求高的表面最后进行磨削加工。其他外圆面采用粗车、半精车、精车加工的加工方案。

2) 划分加工阶段。该轴加工划分为 3 个加工阶段，即粗车（粗车外圆、钻中心孔)、半精车（半精车各处外圆、台肩和修研中心孔等）和粗磨。

3) 选择定位基准。各工序的定位基准应根据粗、精基准选择原则合理选定，如果某工序的定位基准与设计基准不一致，就应该对该工序尺寸进行换算。本零件各表面的设计基准一般是轴的中心线，其加工的定位基准，最常用的是中心孔。采用中心孔作为定位基准符合基准统一原则，可以在一次装夹中加工出多处外圆和端面，并能保证各外圆轴线的同轴度等精度要求。

4) 加工工序安排。应遵循加工顺序安排的一般原则，例如先粗后精、先主后次等。本零件是轴类零件先加工主要表面外圆面，再加工次要表面键槽。键槽的加工一般安排在半精加工之后。

5) 热处理工序安排。根据零件性能要求，合理安排预备热处理和最终热处理。一般改

善切削性能的正火、退火安排在粗加工前；调质处理安排在粗加工之后、半精加工前；淬火、渗氮处理等最终热处理放在精加工之间进行。本零件要求调质处理达 220～250HBS，安排在粗加工之后，半精加工之前进行。

该轴的加工工艺路线为下料→车端面、钻中心孔→粗车→调质热处理→修研中心孔→半精车→铣键槽→粗磨→检验。

（4）确定工序尺寸

毛坯为圆棒料，一般在确定毛坯尺寸时可以通过确定加工余量得到毛坯尺寸，具体确定方法有分析计算法、经验估计法和查表修正法。

毛坯为锻件，一般可以通过查找相关机械加工工艺手册的图表进行确定。

1）毛坯下料尺寸：$\phi 44 \times 170$。

2）粗车时，各外圆及各段尺寸按图纸加工尺寸均留余量 2mm。

（5）选择机床种类及工装、夹具、量具和所用到刃具

在保证加工质量的基础上选择经济合理的机床设备进行加工。

（6）确定切削用量

（7）填写机械加工工艺过程卡片（见表 2-14）、工序卡（见表 2-15）

表 2-14　传动轴机械加工工艺过程卡

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td rowspan="2">机械加工工艺过程卡片</td><td>零件图号</td><td colspan="2"></td><td>共 1 页</td></tr>
<tr><td>零件名称</td><td colspan="2">传动轴</td><td>第 1 页</td></tr>
<tr><td>材料牌号</td><td>45</td><td>毛坯种类 棒料 毛坯外形尺寸</td><td></td><td>每件台数</td><td>备注</td><td></td></tr>
<tr><td>序号</td><td>工序名称</td><td>工序内容</td><td>夹具</td><td>设备</td><td>刀具</td><td>量具</td></tr>
<tr><td>1</td><td>下料</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td>车端面，钻中心孔</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td>粗车</td><td>车大外圆及倒角</td><td>三爪卡盘</td><td>CA6140</td><td>外圆车刀</td><td>千分尺</td></tr>
<tr><td>4</td><td>调质处理</td><td>调质处理为 HBS220～250</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>5</td><td>修研中心孔</td><td>修研两端中心孔</td><td>三爪卡盘</td><td>CA6140</td><td>金刚石研磨头</td><td></td></tr>
<tr><td>6</td><td>半精车</td><td>车各外圆及倒角</td><td>三爪卡盘</td><td>CA6140</td><td>外圆车刀</td><td>千分尺</td></tr>
<tr><td>7</td><td>铣键槽</td><td>粗精铣 $12_{0}^{+0.018}$mm 槽</td><td>平口虎钳</td><td>X6132</td><td>键槽铣刀</td><td>键槽塞规</td></tr>
<tr><td>8</td><td>粗磨</td><td>磨削 $\phi 25_{+0.017}^{+0.033}$ 至图纸技术要求</td><td>顶尖</td><td>M1432A</td><td>砂轮</td><td>千分尺</td></tr>
<tr><td>9</td><td>检验</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

								校对（日期）	审核（日期）	标准化（日期）
标记	处数	更改文件号	签字	日期	标记	处数	更改文件号			

表 2-15 传动轴机械加工工序卡

机械加工工序卡片	产品型号	传动轴	零件图号			
	产品名称		零件名称		共 页	第 页

	车间	工序号	工序名称	材料牌号	
	毛坯种类	毛坯外形尺寸	每毛坯可制件数	每台件数	
	棒料	ϕ44×170			
	设备名称	设备型号	设备编号	同时加工件数	
	车床	CA6140			
	夹具编号		夹具名称	切削液	
			三爪盘		
	工位器具编号		工位器具名称	工序工时（分）	
				准终	单件

工步号	工步内容	工艺装备	主轴转速	切削速度	进给量	切削深度	进给次数	工步工时	
			r/min	m/min	mm/r	mm		机动	辅助
1	粗车	三爪卡盘、千分尺、外圆车刀	477	48	0.5	1.4	1		
标记	处数	更改文件号	签字	日期	标记	处数	更改文件号	签字	日期



习题

1. 什么是生产过程、工艺过程和工艺规程？
2. 什么是工序、安装、工步、走刀和工位？
3. 生产类型是根据什么划分的？常用的有哪几种生产类型？
4. 什么是基准？工艺基准包括哪几种基准？
5. 毛坯选择时应考虑哪些因素？
6. 精基准选择原则有哪些？
7. 表面加工方法选择时应考虑哪些因素？
8. 工件加工质量要求较高时，应划分哪几个加工阶段？划分加工阶段的原因是什么？
9. 机械加工工序如何安排？

10. 成批生产如图 2-28 所示的工件时，用端面 A 来加工表面 B，试标注铣削表面 B 时的工序尺寸及其上、下偏差。

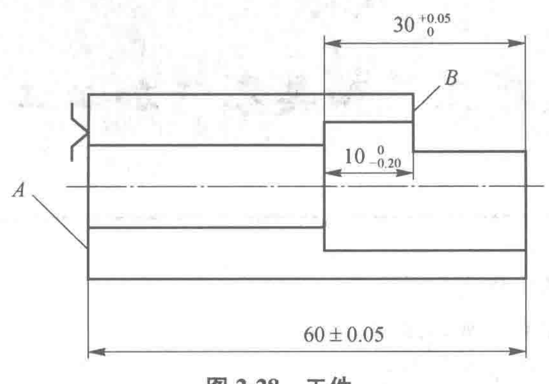


图 2-28　工件

11. 如图 2-29 所示的工件，内、外圆与端面均以加工完成，现需铣削右端槽口，求试调整刀具时的测量尺寸 H，A 及其上、下偏差。

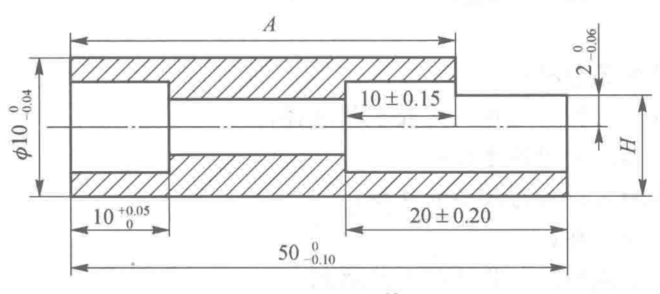


图 2-29　工件

12. 试按工艺卡片要求编制如图 2-30 所示阶台轴的工艺规程（材料为 45 钢，大批量生产）。

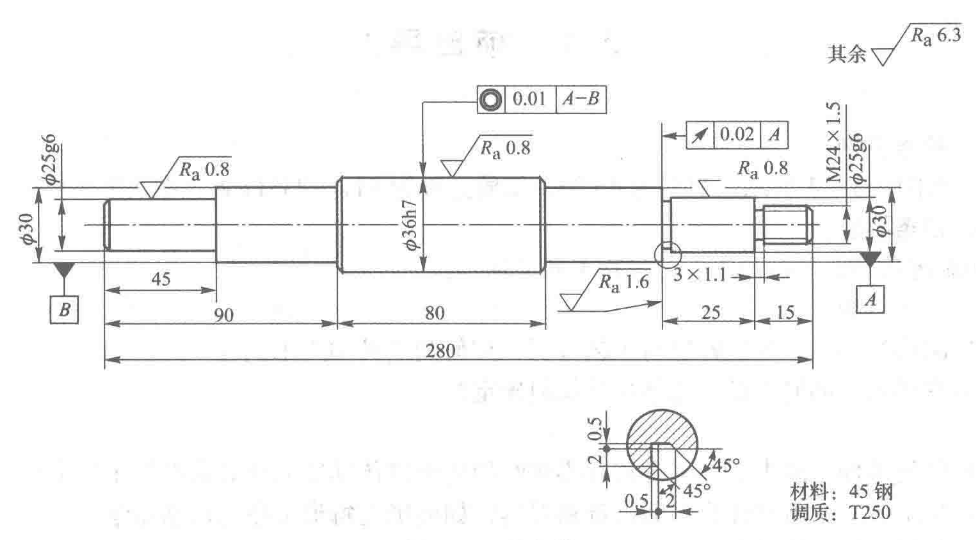


图 2-30　阶台轴

项目三　轴类零件加工工艺

【知识点】
- 轴类零件的基本概念；
- 轴类零件外圆表面加工方法；
- 轴类零件加工的常用设备；
- 轴类零件加工的常用刀具；
- 轴类零件的装夹方式；
- 轴类零件的常用测量仪器。

【技能点】
- 轴类零件工艺分析；
- 轴类零件的材料、毛坯及热处理的选择；
- 外圆表面加工方案的选择；
- 轴类零件加工设备与装备的选择；
- 轴类零件的装夹；
- 轴类零件机械加工工艺过程卡的编制；
- 轴类零件机械加工工序卡的编制。

3.1　项目导入

1. 任务案例

传动轴如图 3-1 所示，材料为 45 钢，调质处理为 217～255HBS，中小批量生产。

2. 任务要求

编制传动轴的机械加工工艺过程卡和工序卡。

3. 任务引导

1）阅读零件图，对零件进行工艺分析，如何判断其加工工艺性？

2）零件毛坯如何选择，毛坯尺寸如何确定？

3）轴类零件外圆表面加工方法有哪些？如何确定传动轴的外圆表面加工方案？

4）加工传动轴需要什么样的设备和刀具？如何确定每道工序的切削用量？

5）怎样把传动轴装夹在机床上？

6）怎样测量传动轴的加工精度？

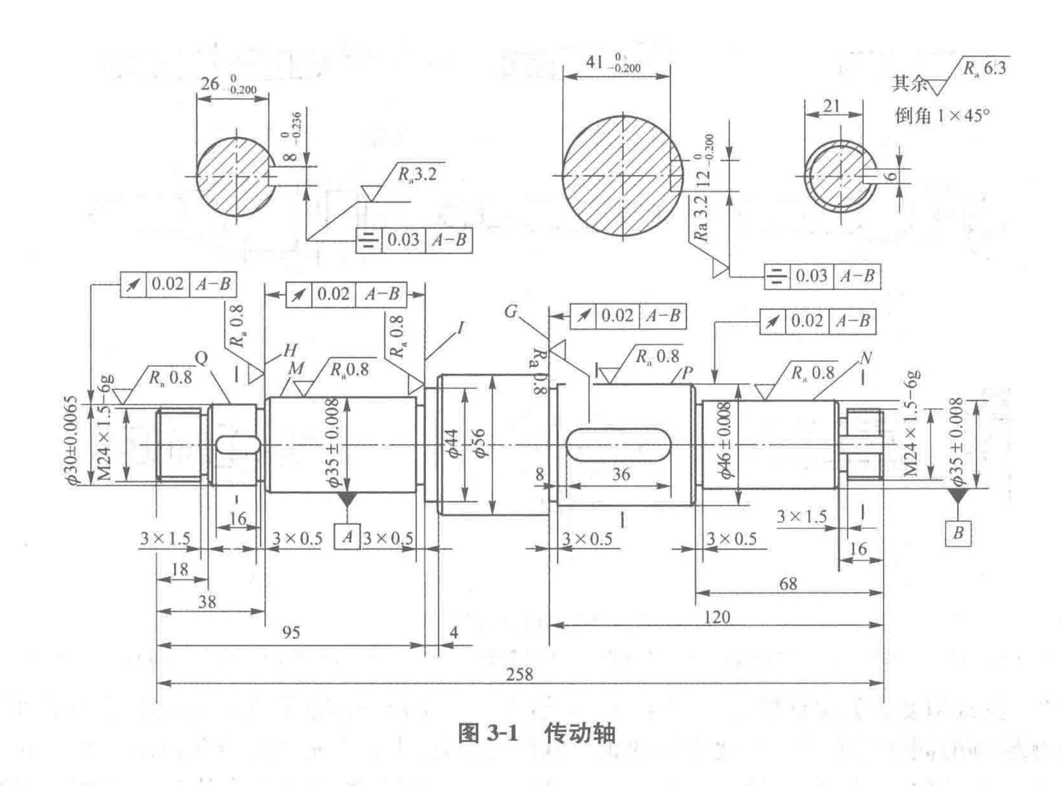


图 3-1　传动轴

3.2　轴类零件工艺分析

3.2.1　轴类零件的功用及结构特点

轴类零件是机器中最常见的零件之一，其主要功用是支承传动件，传递运动或扭矩，并保证一定的回转精度。轴类零件是回转体零件，其长度大于直径，主要由同轴线的内外圆柱面、内外圆锥面、螺纹和相应的端面组成，有些轴上还有花键、沟槽及横孔等结构。

根据结构形状的不同，轴类零件可以分为光轴、阶梯轴、空心轴和异形轴（如曲轴、凸轮轴、偏心轴、花键轴）等几大类，如图 3-2 所示。

3.2.2　轴类零件的技术要求

轴类零件的技术要求一般根据轴的主要功用和工作条件而定。一般传动轴有两个支承轴颈，工作时通过轴颈支承在轴承上。这两个支承轴颈是轴的装配基准，通常也是其他表面的设计基准，所以它的精度和表面质量一般要求较高；对于一些重要的轴，通常还会规定圆度、圆柱度、同轴度等形状精度要求等。轴类零件的技术要求一般包括以下几个方面：

1）尺寸精度。轴类零件的尺寸精度主要指轴的直径尺寸精度。轴颈的直径尺寸精度通常为 IT6～IT9 级，精密轴颈可达 IT5 级。

2）形状精度。主要是指轴颈、外锥面、莫氏锥孔等的圆度、圆柱度等，一般应限制在尺寸公差范围内。几何形状精度要求较高时，可在图纸上另行规定其允许的公差。

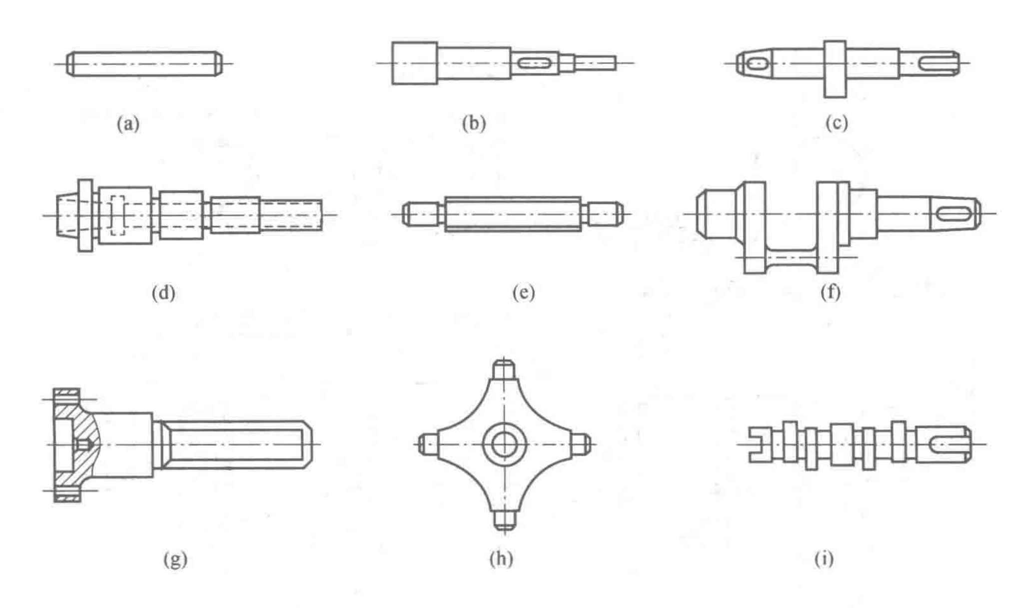


图 3-2 轴的种类

(a) 光轴；(b) 阶梯轴；(c) 偏心轴；(d) 空心轴；(e) 花键轴；(f) 曲轴；(g) 半轴；(h) 十字轴；(i) 凸轮轴

3）位置精度。为保证轴上传动件的传动精度，通常应规定装配传动件的配合轴颈相对于支承轴颈的同轴度要求。普通精度的轴，其配合轴段对支承轴颈的径向跳动一般为 0.01～0.03mm，高精度轴为 0.001～0.005mm。此外，相互位置精度还有内外圆柱面的同轴度，轴向定位端面与轴心线的垂直度要求等。

4）表面粗糙度。轴类零件表面粗糙度根据机械的精密程度和零件表面工作部位的不同来确定。一般情况下，支撑轴颈的表面粗糙度值为 R_a0.63～0.16μm，配合轴颈的表面粗糙度值为 R_a0.63～0.16μm。

3.2.3 轴类零件的材料、毛坯及热处理

1. 轴类零件的材料

轴类零件的材料主要根据轴的工作条件和使用要求的不同进行合理选用。常用的轴类零件材料有 35，45，50 等优质碳素结构钢，经过调质或正火后，可得到较好的切削性能，获得较高的强度和一定的韧性，其中以 45 钢用得最为广泛；对于受载荷较小或不太重要的轴，则可采用 Q235，Q255 等碳素结构钢。

对于受力较大，轴的尺寸、重量受限制或者某些有特殊要求的可采用合金钢。例如，中等精度而转速较高的轴类零件可选用 40Cr 等合金钢，这类材料经调质处理后具有较好的综合力学性能；精度较高的轴，可选用 Cr15，65Mn 等合金钢，经调质和表面高频淬火后，表面硬度可达 50～58HRC，并具有较高的耐疲劳性能和较好的耐磨性能；对于在高速、重载等条件下工作的轴，选用 20Cr，20CrMnTi 等低碳合金钢，经渗碳淬火后，不仅具有很高的表面硬度，同时心部强度也大大提高；精密机床的主轴可选用 38CrMoAlA 氮化钢，经调质和表面氮化后，比渗碳淬火钢具有更高的耐磨性、抗冲击韧性和耐疲劳强度。

尺寸较大或结构复杂的轴可采用球墨铸铁、高强度铸铁或铸钢等材料。例如，用稀土-镁球墨铸铁制造曲轴、凸轮轴，具有成本低廉、强度高、韧性好、减摩、吸振、对应力集中

敏感性小等优点，已被应用于制造汽车、拖拉机、机床上的重要轴类零件。

2. 轴类零件的毛坯

轴类零件毛坯的选用主要与轴的结构特点、使用要求、生产类型以及设备条件有关。对于光轴或直径相差不大的阶梯轴，常用热轧或冷拉棒料毛坯；直径相差较大的阶梯轴或重要的轴，一般采用锻件毛坯。锻件毛坯经过加热锻造后，能使金属内部的纤维组织分布合理，得到较高的抗拉、抗弯及抗扭强度，这样既可改善力学性能，又能节约材料、减少机械加工的工作量。根据生产规模的大小，毛坯的锻造方式有自由锻和模锻两种。中小批生产多采用自由锻，大批量生产时采用模锻。某些大型的、外形结构复杂的轴（如内燃机中的曲轴），在质量允许时也可采用铸件毛坯。

3. 轴类零件的热处理

轴的质量除与所选钢材的种类有关外，还与热处理有关。轴的锻造毛坯在机械加工之前，均需进行正火或退火处理，以使钢材的晶粒细化，消除锻造后的残余应力，降低毛坯硬度，改善切削加工性能。

凡是要求局部表面淬火以提高耐磨性的轴，须在淬火前安排调质处理（有时也采用正火）。当毛坯加工余量较大时，调质放在粗车之后、半精车之前，利用调质处理消除粗加工产生的残余应力；当毛坯余量较小时，调质可安排在粗车之前进行。表面淬火一般放在精加工之前，可保证淬火引起的局部变形在精加工中得到纠正。对于不需淬硬部分的加工，如车螺纹、铣键槽等工序，均安排在局部淬火和粗磨之后。

对于精度要求较高的轴，在局部淬火和粗磨之后需安排低温时效处理，以消除淬火及磨削中产生的残余应力和残余奥氏体，控制尺寸稳定；对于整体淬火的精密主轴，在淬火之后，一般还要进行冷处理，以进一步减少残余奥氏体，保证主轴尺寸精度的稳定性。

3.3 轴类零件外圆表面加工方法

外圆表面是轴类零件的主要表面，如轴类、套类和盘类零件是具有外圆表面的典型零件。根据外圆表面的尺寸、材料及加工要求不同，可选择不同的加工方法，常见的外圆表面的加工方法有车削、磨削和光整加工。

3.3.1 车削加工

车削加工是加工外圆表面的主要方法，适用于各种批量的轴类零件外圆加工，应用十分广泛。单件、中小批生产常采用卧式车床加工，大批生产则采用自动、半自动车床或专用车床完成车削加工。大尺寸工件可采用大型立式车床加工，高精度的复杂零件则宜采用数控车床加工。根据毛坯的制造精度和工件最终加工要求，外圆车削一般可分为粗车、半精车、精车和精细车。

1. 粗车

粗车的主要目的是切去毛坯大部分余量，对产品尺寸、粗糙度要求不高，通常采用较大的背吃刀量、较大的进给量和中速车削，以尽可能提高生产率。加工后工件尺寸精度为IT11～IT13，表面粗糙度值为R_a50～12.5μm。

2. 半精车

粗加工后的表面余量仍会有较大误差，为了保证精加工时有稳定的加工余量，一般会安排半精加工。半精车可作为中等精度表面的终加工，也可作为磨削或精加工的预加工。对于精度较高的毛坯，可不经粗车，直接半精车。半精车的尺寸精度为IT9～IT10，表面粗糙度值为R_a6.3～3.2μm。

3. 精车

精车一般安排在半精车之后进行，作为较高精度外圆的终加工或光整加工的预加工，通常在高精度车床上加工，以保证零件加工精度和表面粗糙度的要求。精车一般采用很小的切削深度和进给量进行低速或高速车削。低速精车一般采用高速钢车刀，高速精车常用硬质合金车刀。精车后的尺寸精度可达IT7～IT8，表面粗糙度值为R_a1.6～0.8μm。

4. 精细车

精细车是高精度、低粗糙度表面的最终加工工序。精细车要求机床精度高，刚性好，传动平稳，能微量进给，无爬行现象。刀具采用金刚石或细晶粒的硬质合金，经仔细刃磨和研磨后可获得很锋利的刀刃。切削时采用高的切削速度、小的背吃刀量和小的进给量。加工后尺寸精度可达IT5～IT6级，表面粗糙度值可达R_a1.0～0.1μm，甚至可达镜面效果。由于有色金属一般不宜采用磨削，所以常用精细车代替磨削加工。

3.3.2 磨削加工

磨削是外圆表面精加工的主要方法，适合于各种高硬度和淬火后的零件的精加工。根据加工质量等级，外圆磨削主要分为粗磨和精磨两种。一般粗磨尺寸精度为IT7～IT8，表面粗糙度值为R_a1.6～0.8μm；精磨后工件尺寸精度可达IT6～IT7，表面粗糙度值为R_a0.8～0.2μm。根据磨削时工件定位方式的不同，外圆磨削又可分为中心磨削和无心磨削两大类。

1. 中心磨削

磨削时工件由中心孔或外圆定位，在外圆磨床或万能外圆磨床上加工。按进给方式的不同，磨削方法有纵磨法和横磨法等。

1）纵磨法。纵磨法即纵向进给磨削法，磨削时工件随工作台作直线往复纵向进给运动，工件每往复一次，砂轮横向进给一次，如图3-3（a）所示。虽因走刀次数多降低了生产率，但能获得较高的精度和较小的表面粗糙度，在生产中应用广泛，适于磨削长度与砂轮宽度之比大于3的工件。

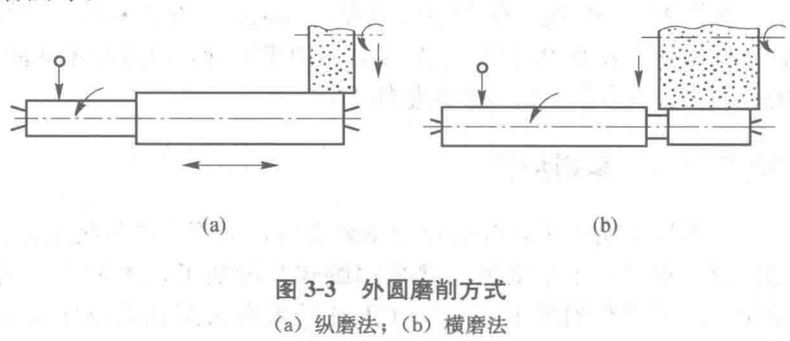


图3-3 外圆磨削方式

（a）纵磨法；（b）横磨法

2）横磨法。横磨法即横向进给磨削法，磨削时工件不作纵向进给运动，砂轮以缓慢的速度连续或断续地向工件作径向进给运动，直至磨去全部余量为止，如图3-3（b）所示。横磨法生产效率高，但磨削时发热量大，散热条件差，且径向力大，故一般只用于大批量生产中磨削刚性较好、长度较短的外圆及两端都有台阶的轴颈。

2. 无心磨削

无心磨削以被磨削的外圆本身作为定位基准，一般在无心磨床上进行。磨削时，工件不需要顶尖定心和支承，而用托板支承直接放在砂轮与导轮之间进行磨削，工件的轴心线稍高于砂轮与导轮连线的中心即可，如图 3-4 所示。导轮采用摩擦系数大的结合剂（如橡胶）制造，其直径较小、速度较低，一般为 20～80m/min，依靠摩擦力带动工件旋转；而砂轮速度则大大高于导轮速度，是磨削的主运动，对工件外圆表面的磨削起主要作用。

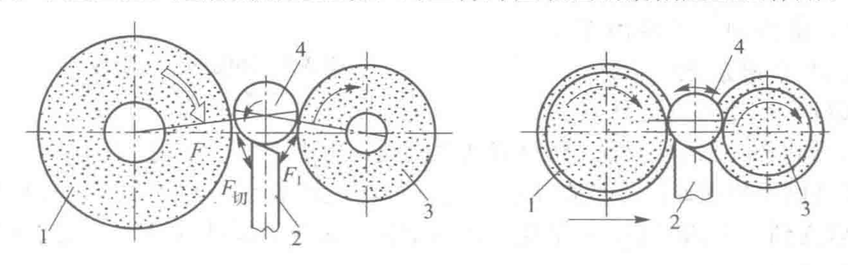


图 3-4　无心磨削

1—砂轮；2—托板；3—导轮；4—工件

与中心磨削法相比，无心磨削无须打中心孔且工件装夹省时省力，操作简单；可连续磨削，生产效率较高；易于实现工艺过程的自动化。但机床调整复杂，只适用于大批生产；无心磨削前工件的形状误差会影响磨削的加工精度，且不能改善加工表面与工件上其他表面的位置精度；不能磨削带有键槽、花键和横孔等断续表面的轴。

3.3.3　光整加工

当工件的加工精度和表面质量要求更高时，在外圆表面精加工后往往还要进行精密加工。外圆表面常用的精密加工方法有高精度磨削、研磨、抛光和超精加工等。

1. 高精度磨削

使工件表面粗糙度值小于 $R_a0.1\mu m$ 的磨削加工工艺，通常称为高精度磨削。高精度磨削的余量一般为 0.02～0.05mm，磨削时背吃刀量一般为 0.002 5～0.005mm。高精度磨削在高精度磨床上进行，为了减小磨床振动，磨削速度应较低，一般取 15～30m/s。高精度磨削后的工件在形状精度、位置精度、尺寸精度，粗糙度和波纹度等方面都具有很高的精度和质量级别。

2. 研磨

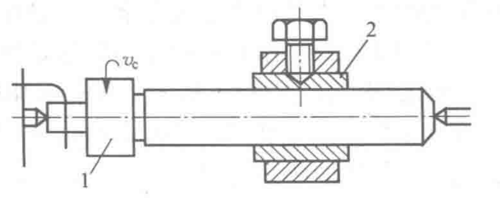
研磨是利用涂敷或压嵌在研具上的磨料颗粒对加工表面进行的光整加工的工艺方法。研磨时，研具与工件在一定压力下的相对运动，通过研磨剂的机械和化学作用，从工件表面切除一层极微薄的材料，同时工件表面形成复杂网纹，从而达到很高的精度和很小的粗糙度值。加工精度可达IT5～IT6，表面粗糙度可达 $R_a0.63\sim0.01\mu m$。

研磨剂（膏）由磨料、研磨液和辅助填料等混合而成，有液态、膏状和固态 3 种，以适应不同的加工需要，其中以研磨膏应用最为广泛。磨料主要起切削作用，常用的有刚玉、碳化硅、金刚石等，其粒度在粗研时选 80#～120#，精研时选 150#～240#，镜面研磨时选用微粉级 W28～W0.5。研磨液有煤油、全损耗系统用油、工业用甘油等，主要起冷却、润滑和充当磨料载体的作用，并能使磨粒较均匀地分布在研具表面。辅助填料可使金属表面生成

极薄的软化膜，易于切除，常用的有硬脂酸、油酸等化学活性物质。

研磨可分为手工研磨和机械研磨两类。

1）手工研磨。外圆手工研磨采用手持研具或工件进行。例如，在车床上研磨外圆时，工件和研磨套之间涂上研磨剂，工件由车床主轴带动做低速旋转（20～30r/min），研磨套用手扶持作轴向往复移动，如图 3-5 所示。手工研磨劳动强度大，生产率低，多用于单件小批量生产。



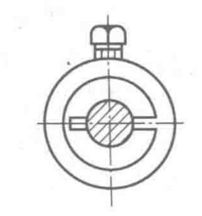


图 3-5　外圆的手工研磨

1—工件；2—研磨套

2）研磨外圆。机械研磨外圆在研磨机上进行，生产效率高，适用于大批量生产。但研磨工件的形状受到一定的限制，一般用于研磨滚柱、滚珠类零件的外圆。图 3-6 所示为研磨机研磨滚柱的外圆。

研磨的工艺特点及应用如下：① 设备和研具简单，成本低；② 加工方法简便，质量可靠。可获得很高的精度和很低的 R_a 值，但一般不能提高加工面与其他表面之间的位置精度；③ 可加工钢、铸铁、铜铝及其合金、硬质合金、陶瓷、玻璃及某些塑料制品等材料的内外圆柱面、圆锥面、平面、螺纹和齿形等表面；④ 广泛用于生产加工各种批量的精密零件，如量规、精密配合件、光学零件等。

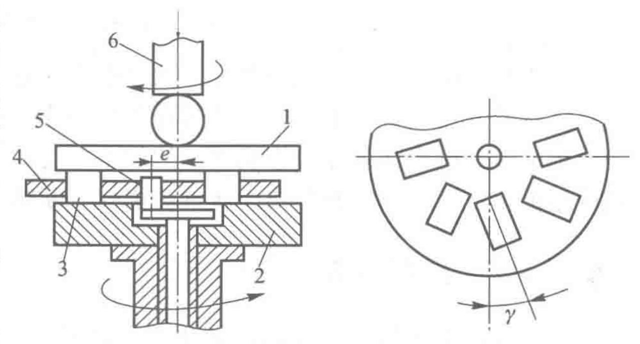


图 3-6　机械研磨

1—上研磨盘；2—下研磨盘；3—工件；4—隔离盘；5—偏心轴；6—悬臂轴

3. 抛光

抛光是利用柔性抛光工具和磨料颗粒或其他抛光介质对工件表面进行的加工，以降低工件表面粗糙度，获得光亮、平整表面的加工方法。抛光以得到光滑表面或镜面光泽为目的，但不能提高工件的尺寸精度和形状精度。普通抛光工件表面粗糙度可达 R_a0.4μm，超精研抛光表面粗糙度值可以达到 R_a0.008μm。除机械抛光外，根据机理不同，抛光还有化学抛光、电解抛光、超声波抛光等方法。

4. 超精加工

超精加工是利用装在振动头上的细粒度油石对工件表面进行微量切削的精整加工。在充分的冷却润滑条件下，安装在振动头上的细粒度油石以一定压力（一般取 0.05～0.3MPa）与工件接触，并作频率为 5～50Hz、振幅为 1～6mm 的纵向振动；工件作 15～150m/min 的旋转运动。因此，油石上的磨粒相对于工件表面的综合运动轨迹为一正弦曲线，这有利于磨粒保持锋利的切削刃和有效地消除工件表面的形状误差。

超精加工的工艺特点及应用如下：① 设备简单，自动化程度较高，操作简便，对工人技术水平要求不高；② 切削余量极小（3～10μm），加工时间短（30～60s），生产率高；③ 超精加工主要是表面质量，表面粗糙度可达 R_a0.2～0.012μm，可适当提高形状精度；④ 主

要用于加工曲轴、轧辊、轴承环和某些精密零件的内外柱圆、圆锥面、平面、沟道表面和球面等。

3.3.4 外圆表面加工方案的选择

外圆表面常用的机械加工方法有车削、磨削和各种光整加工方法。各种加工方法所能达到的经济加工精度、表面粗糙度、生产率和生产成本各不相同，必须根据具体情况，选择合理的加工方案，才能加工出满足图纸要求的合格零件。例如，车削加工是外圆表面最经济有效的加工方法，但就其经济精度来说，一般适于作为外圆表面粗加工和半精加工方法；磨削加工是外圆表面主要精加工方法，适用于各种高硬度和淬火后轴零件的精加工；光整加工是精加工后进行的超精密加工方法（如研磨、抛光、滚压等），适用于某些精度和表面质量要求很高的零件。

零件上一些精度要求较高的表面，仅用一种加工方法往往是难以达到其规定的技术要求的。确定某个表面的加工方案时，应根据其加工精度、表面粗糙度等技术要求确定最终加工方法，然后根据此种加工方法的特点确定前道工序的加工方法，直至毛坯加工。

表 2-7 为外圆表面的各种加工方案所能达到的经济加工精度、表面粗糙度及适用范围。由于获得同一精度及表面粗糙度的加工方法有多种，实际选择时应根据零件的结构、形状、尺寸大小、材料及热处理要求全面考虑，对不同加工方法进行有序组合，形成零件的加工方案。例如，表中 3 号与 5 号两种加工方案都能达到相同的精度等级，若零件未经淬火，则两种加工方案均可采用；但当加工表面需淬硬时，最终加工方法只能采用磨削。再如，表中 6 号与 8 号两种加工方案能达到的精度等级也相同，若零件的材料为钢铁时，最终工序可采用磨削加工；若零件材料为有色金属，则只宜采用精细车。

3.4 轴类零件加工设备

3.4.1 金属切削机床的基本知识

1. 机床的分类

金属切削机床，简称为机床，是利用刀具对金属毛坯进行切削，使其成为具有一定形状、尺寸精度和表面质量机器零件的一种加工设备。机床的品种规格繁多，为了便于区别、使用和广利，必须加以分类。对机床的分类方法主要有以下几种。

按机床的加工性质和使用的刀具，机床可分为车床、钻床、镗床、磨床、齿轮加工机床、螺纹加工机床、铣床、刨插床、拉床、特种加工机床、锯床和其他机床共 12 类。在每一类机床中，又按工艺范围、布局形式和结构等，分为 10 个组，每一组又细分为若干系或系列。

按机床的通用性程度，同类型机床可分为通用机床、专门化机床和专用机床。通用机床的加工范围较广，通用性较大，可用于加工多种零件的不同工序，如卧式车床、万能外圆磨床、万能升降台铣床等。通用机床的结构往往比较复杂，主要适用于单件小批量生产。专门化机床的工艺范围较窄，往往只能用于加工某一类（或少数几类）零件的某一道或少数几道

特定工序，如曲轴车床、凸轮车床、螺旋桨铣床等。专用机床的工艺范围最窄，一般是为加工某一种零件的某一道特定工序而设计制造的，如汽车、拖拉机制造中广泛适用的各种钻、镗组合机床等，适用于大批量生产。

按机床的加工精度，可分为普通精度机床、精密机床和高精度机床。

按机床的重量和尺寸，可分为仪表机床、中小型机床（一般机床）、大型机床（10t 以上）、重型机床（30t 以上）和超重型机床（100t 以上）。

按机床的自动化程度，可分为手动、机动、半自动和自动机床。

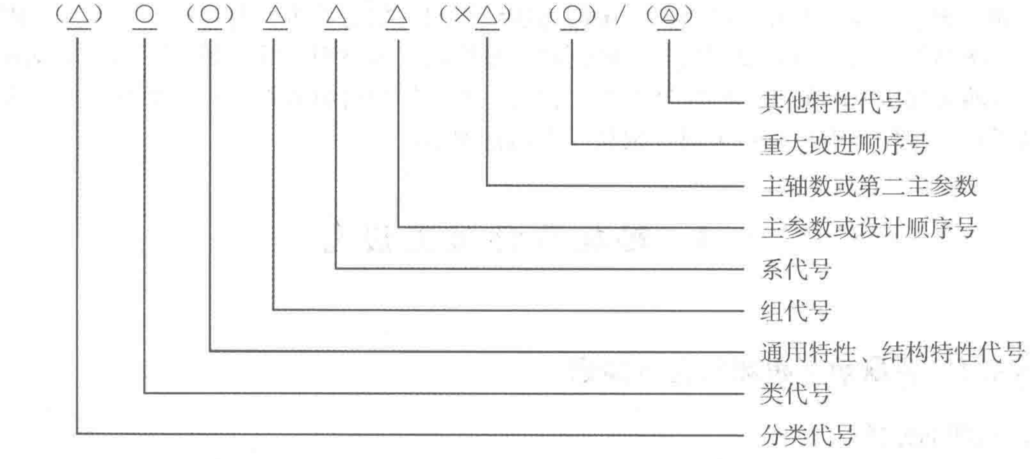
按主轴或刀架的数目，机床又可分为单轴机床、多轴机床、单刀机床和多刀机床。

2. 机床型号的编制方法

机床型号是机床产品的代号，用以简明地表示机床的类型、通用性和结构特性及主要技术参数等。我国现行机床的型号是根据2008 年颁布的国家推荐标准 GB/T 15375—2008《金属切削机床　型号编制方法》进行编制的，由汉语拼音字母和阿拉伯数字按一定规律排列组合而成，适用于各类通用机床、专用机床及自动线，但不包括组合机床和特种加工机床。下面以通用机床为主介绍机床型号的编制方法。

（1）通用机床的型号

通用机床的型号由基本部分和辅助部分组成，中间用“/”隔开，读作“之”，前者需统一管理，后者纳入型号与否由企业自定，型号构成如下：



其中：

1）有“（ ）”的代号或数字，当无内容时，则不表示；若有内容，则不带括号。

2）有“○”符号的，为大写的汉语拼音字母。

3）有“△”符号的，为阿拉伯数字。

4）有“◎”符号的，为大写的汉语拼音字母，或阿拉伯数字，或两者兼有之。

（2）机床的分类及代号

机床按其工作原理划分为车床、钻床、镗床、磨床、齿轮加工机床、螺纹加工机床、铣床、刨插床、拉床、锯床和其他机床等共 11 类，见表 3-1。机床的类代号用大写的汉语拼音字母表示。必要时，每类可分为若干分类。分类代号在类代号之前，作为型号的首位，并用阿拉伯数字表示，如磨床类有 M，2M 和 3M 三个分类。

表 3-1 机床的类别代号

类别	车床	钻床	镗床	磨床			齿轮加工机床	螺纹加工机床	铣床	刨插床	拉床	锯床	其他机床
代号	C	Z	T	M	2M	3M	Y	S	X	B	L	G	Q
读音	车	钻	镗	磨	二磨	三磨	牙	丝	铣	刨	拉	割	其

(3) 机床的特性代号

机床的特性代号有通用特性代号和结构特性代号两种，都用大写的汉语拼音字母表示，位于类别代号之后。通用特性代号有统一的规定含义（见表 3-2），在各类机床的型号中表示的意义相同，如 CK6140 中，K 表示该车床是数控类型。结构特性代号主要是为了区分主参数相同而结构不同的机床，在型号中没有统一的含义。如 CA6140 中，A 是结构特性代号，表示 CA6140 与 C6140 车床主参数相同，但结构不同。

表 3-2 机床的通用特性代号

通用特性	高精度	精密	自动	半自动	数控	加工中心（自动换刀）	仿形	轻型	加重型	柔性加工单元	数显	高速
代号	G	M	Z	B	K	H	F	Q	C	R	X	S
读音	高	密	自	半	控	换	仿	轻	重	柔	显	速

(4) 机床的组、系划分原则及其代号

每类机床可划分为 10 个组，每个组又可划分为 10 个系。在同一类机床中，主要布局或使用范围基本相同的机床，即为同一组。在同一组机床中，其主参数相同、主要结构及布局形式相同的机床，即为同一系。

机床的组用一位阿拉伯数字表示，位于类代号或特性代号之后；机床的系也用一位阿拉伯数字表示，位于组代号之后。表 3-3 给出了车床的组、系代号划分。

表 3-3 车床的组、系代号划分

<table>
<tr><td rowspan="3">类别</td><td rowspan="3">0</td><td rowspan="3">1</td><td rowspan="3">2</td><td rowspan="3">3</td><td rowspan="3">4</td><td rowspan="3">5</td><td colspan="10">6</td><td rowspan="3">7</td><td rowspan="3">8</td><td rowspan="3">9</td></tr>
<tr><td colspan="10">落地及卧式车床</td></tr>
<tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr>
<tr><td>车床C</td><td>仪表车床</td><td>单轴自动车床</td><td>多轴自动半自动车床</td><td>回轮转塔车床</td><td>曲轴及凸轮轴车床</td><td>立式车床</td><td>落地车床</td><td>卧式车床</td><td>马鞍车床</td><td>无丝杠车床</td><td>卡盘车床</td><td>球面车床</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>仿形及多刀车床</td><td>轮轴辊锭及铲齿车床</td><td>其他车床</td></tr>
</table>

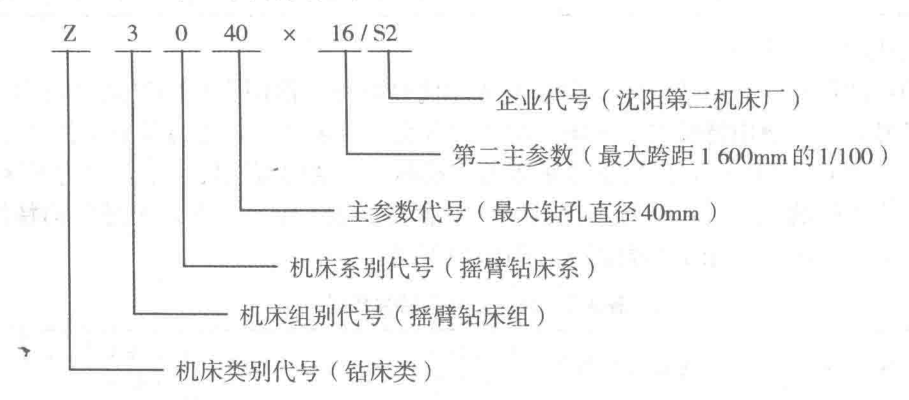
(5) 机床的参数和顺序号

机床的主参数表征了机床规格的大小，反应了机床的加工能力。主参数用折算值表示，位于系代号之后。第二主参数通常指主轴数、工作台工作面长度、最大跨距及最大加工长度等。除多轴机床的主轴数外，第二主参数一般不予表示。当某些机床无法用主参数表示时，可以在型号中用设计顺序号表示。当机床的性能或结构有重大改进时，可按改进的先后顺序用 A，B，C 等汉语拼音字母表示，加在型号基本部分的尾部，以区别原机床型号。

(6) 其他特性代号

其他特性代号，置于辅助部分之首。其中同一型号机床的变型代号，一般应放在其他特性代号之首位。其他特性代号主要用以反映各类机床的特性。如对于数控机床，可用它来反映不同控制系统；对于一般机床，可以反映同一型号机床的变型等。其他特性代号可用汉语拼音字母表示，也可以用阿拉伯数字表示，还可用两者的组合来表示。

例如，Z3040×16/S2 的含义如下：



3. 机床的运动

(1) 工件表面的形成方法

机械零件的形状多种多样，但构成其内、外轮廓的表面主要是平面、圆柱面、圆锥面以及各种成形表面等基本形状的表面。

从几何学的观点来看，大部分表面（除了少数特殊情况，如涡轮叶片的成形面外）都可看成是一条母线沿着导线运动而形成的，如图 3-7 所示。例如，平面可以由直母线 1 沿直导线 2 移动而形成，如图 3-7（a）所示；圆柱面及圆锥面可以由直母线 1 沿圆导线 2 旋转而形成，如图 3-7（b）（c）所示；螺纹表面是由代表螺纹牙型的母线 1 沿螺旋导线 2 运动而形成的，如图 3-7（d）所示；直齿圆柱齿轮的齿形表面则是由渐开线形的母线 1 沿直导线 2 移动而形成的，如图 3-7（e）所示。

母线和导线统称为表面的发生线。在机床加工零件时，刀具和工件按一定规律运动，形成两条发生线，经切削加工获得所需的零件表面。形成发生线的方法主要有轨迹法、成形法、相切法和展成法，如图 3-8 所示。

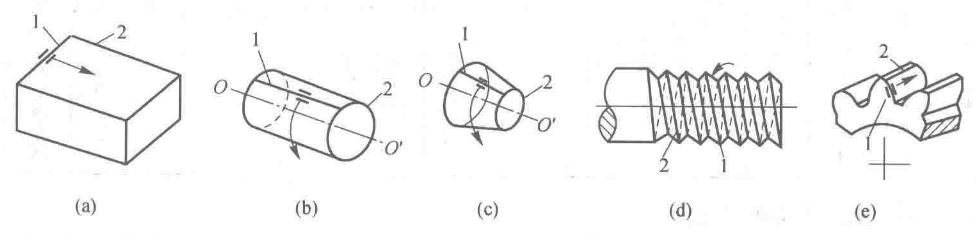


图 3-7 零件表面的形成

1—母线；2—导线

1) 轨迹法。用尖头车刀、刨刀等刀具加工时，刀具切削刃与被加工表面为点接触（实际为很短的一段弧线接触）。为了获得所需的发生线，切削刃必须沿发生线轨迹运动。如图 3-8（a）所示，刨刀沿 A_1 方向作直线运动时，形成直线形母线；刨刀沿 A_2 方向作曲线运动时，形成曲线形导线。因此，采用轨迹法形成所需的发生线，需要一个独立的运动。

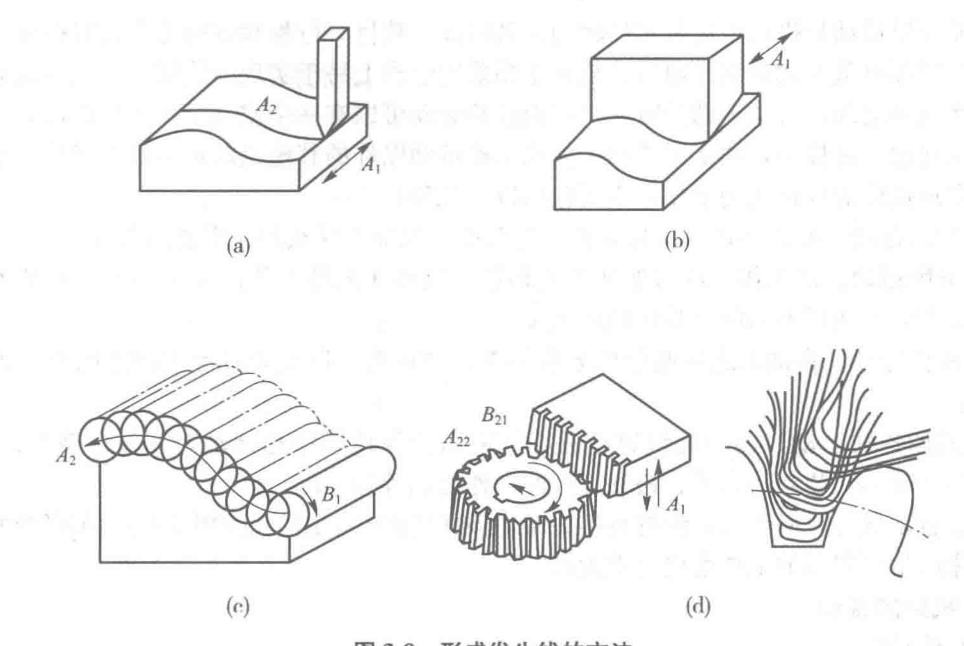


图 3-8　形成发生线的方法

（a）轨迹法；（b）成形法；（c）相切法；（d）展成法

2）成形法。采用成形刀具加工时，切削刃的形状与所需生成的发生线形状一致，因此加工时无须任何运动，便可获得所需的发生线。如图 3-8（b）所示，成形刨刀的切削刃直接形成曲线形母线；刨刀沿 A_1 方向作直线运动，由轨迹法形成直线形导线。

3）相切法。用铣刀、砂轮等旋转刀具加工时，刀具圆周上的切削刃可以看作是一个点或一条线，当该切削点（或线）绕刀具轴线作旋转运动 B_1，且刀具轴线沿着发生线的等距作轨迹运动 A_2 时，各个切削点运动轨迹的包络线就是所加工表面的发生线，如图 3-8（c）所示。因此，采用相切法形成发生线，需要刀具旋转以及刀具与工件之间的相对移动两个彼此独立的运动。

4）展成法。用齿条形插齿刀加工圆柱齿轮时，插齿刀沿 A_1 方向作直线运动，由轨迹法形成直线形母线，工件的旋转运动 B_{21} 和直线移动 A_{22} 使插齿刀能不断地对工件进行切削，刀具切削刃一系列瞬时位置的包络线形成渐开线形导线，如图 3-8（d）所示。用展成法生成发生线时，工件的运动与刀具的运动之间必须保持严格的对应关系，即刀具与工件之间犹如一对齿轮之间或齿轮与齿条之间作啮合运动。此时，两个运动是相互关联的，它们共同组成一种复合运动，即展成运动。

（2）机床的运动

机床加工零件时，为获得所需的表面，工件与刀具之间需要作相对运动，形成具有一定形状的母线和导线。这种形成零件加工表面的运动称为表面成形运动，又称为机床的工作运动。

根据切削过程中所起的作用不同，表面形成运动又可分为主运动和进给运动。主运动是切削工件上的切削层，使之转变为切屑的主要运动。进给运动是使切削得以继续进行，直至形成整个表面的运动。主运动的速度最高，消耗功率最大；进给运动速度较低，消耗的功率也较小。

表面成形运动是机床上最基本的运动，其轨迹、数目、行程和方向等要素对机床的传动和结构形式都有重大的影响。通常，机床主要采用结构上易于实现的旋转运动和直线运动来实现表面成形运动，且主运动只有一个，而进给运动可以有一个或几个，也可以没有。

机床在加工过程中，加工工具与工件除工作运动以外的其他运动称为辅助运动。辅助运动用以实现机床的各种辅助动作，主要包括以下几种：

1）切入运动。使刀具切入工件表面一定深度，保证工件获得所需要的尺寸。

2）分度运动。使工作台或刀架转位或移位，以便在工件上依次加工均匀分布的若干个相同的表面，或使用不同的刀具作顺序加工。

3）调位运动。在加工之前调整机床有关部件的位置，以使刀具和工件之间有正确的相对位置。

4）其他各种运动。如刀具快速趋近工件或退回原位的空程运动，开车、停车、变速、换向等控制运动，装卸、夹紧、松开工件的操作运动等。

辅助运动虽与表面的形成没有直接关系，但在机床整个加工过程中却是必不可少的，往往对机床的生产率和加工精度也有重大影响。

4. 机床的传动

（1）传动链

在机床上，执行件是最终实现所需运动的部件，如主轴、工作台、刀架等；运动源是为执行件的运动提供动力的装置，如各种电机、液动机或气动马达等；传动装置是将运动和动力从运动源传至执行件的装置。机床上为了实现需要的运动，需要通过各种传动装置把执行件与运动源或者把执行件与执行件联系起来，称为传动联系。构成一个传动联系的一系列顺序排列的传动件，称为传动链。

根据传动联系的性质，传动链可以分为两类：

1）外联系传动链。是指联系运动源和机床执行件之间的传动链，不要求运动源和执行件之间有严格的传动比。如车床车削外圆柱表面时，工件与刀具之间不要求严格的传动比关系，两个执行件的运动可以是独立的，因此，工件和刀具的两条传动都是外联系传动链。

2）内联系传动链。是指相互联系的执行件之间有严格的相对运动比例关系的传动链。如车削螺纹时，刀具的移动与工件的转动之间应保持严格的传动关系，即工件每转一转，车刀准确地移动一个螺纹导程的距离。此时，主轴与刀架之间的传动链就是内联系传动链。

（2）传动原理图

为了便于研究机床的传动联系，常用一些简明的符号表示执行件与运动源或者执行件与执行件之间传动关系，称为传动原理图。图 3-9 所示为传动原理图常用的一些示意符号。图 3-10 所示为车螺纹传动原理图，其中电机、工件、刀具、丝杠螺母等均以简单的代号表示。

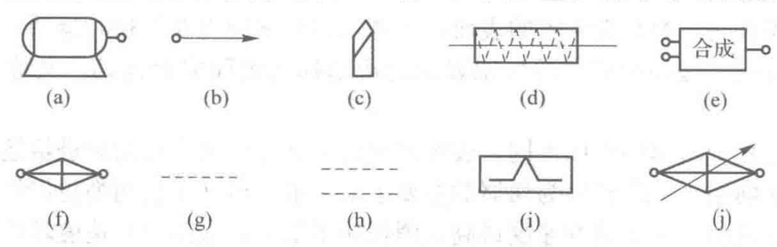


图 3-9　传动原理图常用的示意符号

（a）电动机；（b）主轴；（c）车刀；（d）滚刀；（e）合成机构；（f）传动比可变换的置换机构；（g）传动比不变的置换机构；（h）电的联系；（i）脉冲发生器；（j）快调置换机构（数控系统）

主运动由电动机经定比传动机构 1—2、换置机构 u_v 和定比传动机构 3—4，带动工件作旋转运动 B_{11}，称为主运动传动链。进给运动由主轴经定比传动机构 4—5、进给换置机构 u_x 和定比传动机构 6—7，通过丝杠螺母机构实现车螺纹所需的进给运动 A_{12}，称为车螺纹进给传动链。

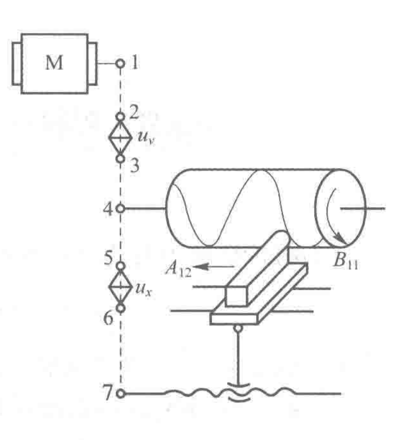


图 3-10　车螺纹传动原理图

（3）传动系统图

机床的传动系统图是表示机床全部运动的传动关系示意图。传动系统图用规定的符号（见国家标准 GB4460—84《机械制图　机构运动简图符号》）代表各种传动元件，传动链中的传动机构按照运动传递的顺序依次排列，并标明电动机的功率和转速、传动轴的编号、齿轮和蜗轮的齿数、蜗杆的头数、丝杠导程和带轮直径等参数，以展开图的形式画在能反映机床外形和各主要部件相互位置的展开图中。

分析传动系统图一般方法如下：

1）确定传动系统图所包含的传动链数；

2）找出各传动链的始端件和末端件；

3）从始端件到末端件依次分析各传动轴之间的传动结构和运动传递关系，找出该传动链的传动路线，以及变速、换向、接通和断开的工作原理；

4）列出传动路线表达式和运动平衡式。

例如，图 3-11 所示为某机床的主运动传动系统图，通过分析可以知道：

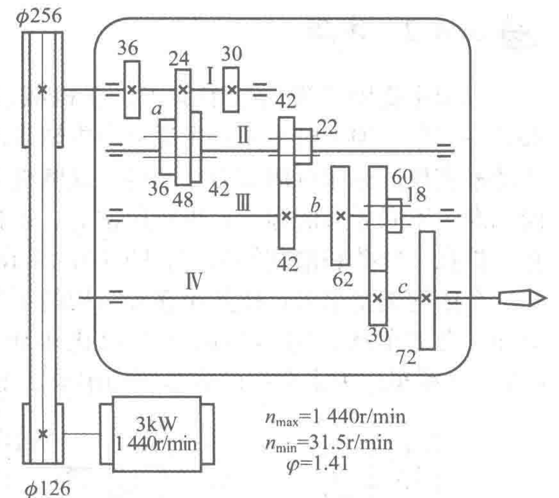


图 3-11　机床主运动传动系统图

1）该图表示了机床的一条主运动传动链；

2）该传动链的始端件为电动机，末端件为主轴；

3）传动顺序为电动机输出轴→轴Ⅰ→轴Ⅱ→轴Ⅲ→主轴Ⅳ。传动方式为带传动和齿轮传动。轴Ⅱ上左边的三个齿轮做成一体，称为三联齿轮块，能作轴向移动，可以分别与轴Ⅰ上的三个固定齿轮相啮合，这六个齿轮构成一个传动组；轴Ⅱ右边的双联齿轮块可与轴Ⅲ上的两个固定齿轮构成一个传动组；轴Ⅲ右边的双联齿轮块可与轴Ⅳ上的两个固定齿轮构成另一个传动组；由于结构上的原因，同一传动组中，同时最多只能有一对齿轮啮合参与工作。

4）传动路线表达式和运动平衡式。将各种可能的传动路线全部列出来，就得到主运动传动链的传动路线表达式，即

$$\underset{1\,440\text{r/min}}{\text{电动机}} - \frac{\phi 126}{\phi 256} - \text{I} - \begin{bmatrix} \frac{36}{36} \\ \frac{30}{42} \\ \frac{24}{48} \end{bmatrix} - \text{II} - \begin{bmatrix} \frac{42}{42} \\ \frac{22}{62} \end{bmatrix} - \text{III} - \begin{bmatrix} \frac{60}{30} \\ \frac{18}{72} \end{bmatrix} - \text{IV（主轴）}$$

为将传动链内各传动副的传动比相连乘组成一个等式，即为运动平衡式：

$$n_{主} = n_{电} \times \frac{126}{256} \times (1-\varepsilon) \times u_{\text{I}-\text{II}} \times u_{\text{II}-\text{III}} \times u_{\text{III}-\text{IV}} \tag{3.1}$$

式中　$n_{主}$，$n_{电}$——电动机输出轴、机床主轴的转速（r/min）；

ε——V 带传动的滑动系数，$\varepsilon \approx 0.02$；

$u_{\text{I}-\text{II}}$，$u_{\text{II}-\text{III}}$，$u_{\text{III}-\text{IV}}$——轴Ⅰ－Ⅱ、轴Ⅱ－Ⅲ、轴Ⅲ－Ⅳ之间的可变传动比。

根据运动平衡式，可算出主运动传动链在图示的齿轮啮合位置时机床主轴转速为

$$n_{主} = 1\,440 \times \frac{126}{256} \times (1-0.02) \times \frac{24}{48} \times \frac{42}{42} \times \frac{60}{90} \approx 695 \text{ r/min}$$

3.4.2　车床

车床主要用于进行车削加工，在机械加工车间中使用最为普遍，占切削机床总数的20%～35%。加工时车床的主运动为主轴带动工件作回转运动，进给运动通常由刀具的直线移动来实现。车床可用车刀车削内、外圆柱面、圆锥面及成形回转面，或车削端面和各种不同标准、不同牙形的螺纹；也可用钻头、扩孔钻、铰刀、丝锥、板牙、滚花刀等刀具进行钻孔、扩孔、铰孔和滚花等加工。图 3-12 所示为车床所能加工的典型零件表面。

车床的类型很多，按其用途和结构的不同，可分为卧式车床、立式车床、转塔车床、自动和半自动车床、仿形车床和专门化车床等，其中以卧式车床应用最为广泛。下面以CA6140 型车床为主介绍卧式车床的组成、主要结构和传动系统。

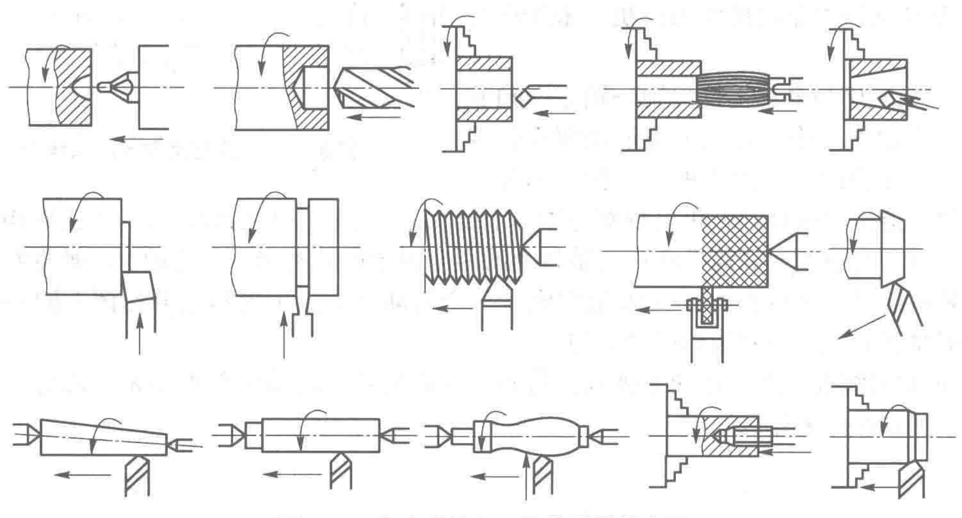


图 3-12　车床所能加工的典型零件表面

1. CA6140 型卧式车床的组成和主要技术参数

CA6140 型卧式车床是目前最常见的型号之一，其结构具有典型的普通车床布局。该机床通用性好，加工范围广，适合于各种中小型轴类、套类和盘类零件的加工。图 3-13 所示为 CA6140 型卧式车床的外形图，其主要组成部件及功用如下所述。

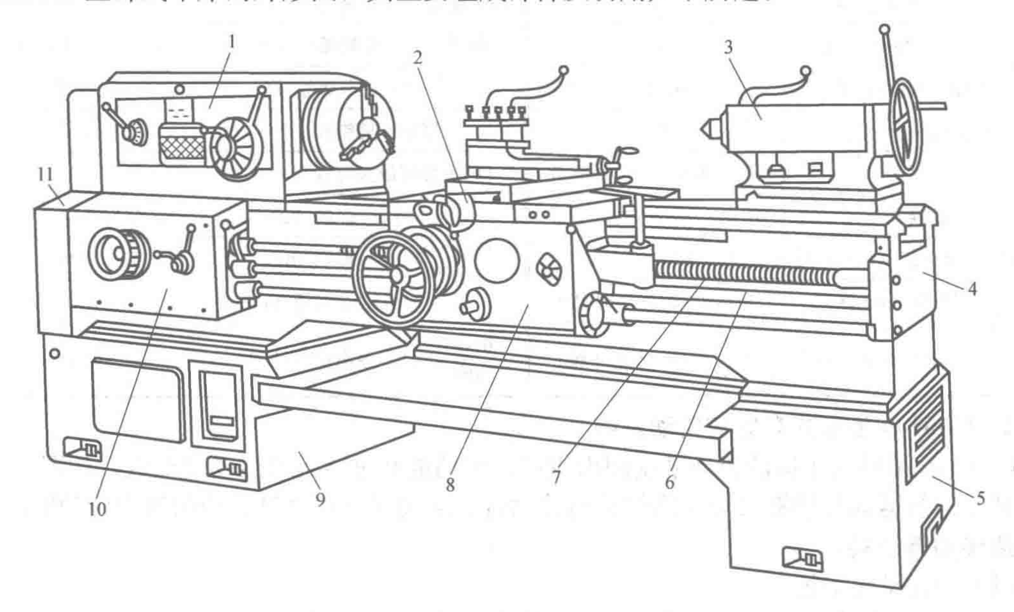


图 3-13　CA6140 卧式车床的外形

1—主轴箱；2—刀架；3—尾座；4—床身；5，9—床腿；6—光杠；7—丝杠；8—溜板箱；10—进给箱；11—挂轮变速机构

1）床身。床身 4 固定在左、右床脚 5 和 9 上。床身的主要作用是支承机床各部件，并使它们保持准确的相对位置或运动轨迹。

2）主轴箱。主轴箱 1 固定在床身的左端。主轴箱内装有主轴及主运动变速机构，其主要功用是支承并传动主轴。主轴通过安装于其前端的卡盘装夹工件，并带动工件作旋转主运动。

3）刀架。刀架 2 安装在床身上的刀架导轨上，用来装夹车刀，并实现纵向、横向或斜向进给。

4）进给箱。进给箱 10 固定在床身的左前面。进给箱内装有进给运动的换置机构，包括进给量的变速机构、螺纹导程变换机构等，用来改变机动进给的进给量或被加工螺纹导程。

5）溜板箱。溜板箱 8 位于刀架下方，与刀架连接在一起。溜板箱可把进给箱传来的运动传递给刀架，使刀架实现纵向进给、横向进给、快速移动或车削螺纹。

6）尾座。尾座 3 装在床身的尾座导轨上。尾座套筒中的锥孔可安装顶尖以支承较长工件的一端，也可安装钻头、铰刀等孔加工刀具来加工内孔。尾座的纵向位置可沿尾座导轨进行调整，以适应不同长度工件的加工。尾座的横向位置可相对于底座在小范围内进行调整，以车削锥度较小的长外圆锥面。

CA6140 型卧式车床的主要技术参数见表 3-4。

表 3-4　CA6140 型卧式车床的主要技术参数

名称		技术参数	名称		技术参数
最大加工直径	床身上/mm	400	加工螺纹范围	公制螺纹/mm	1～192（44 种）
	刀架上/mm	210		英制螺纹/tpi	2～24（20 种）
	棒料/mm	47		模数螺纹/mm	0.25～48（39 种）
最大加工长度/mm		650、900、1400、1900		径节螺纹/DP	1～96（37 种）
中心高度/mm		205	尾座套筒锥孔		莫氏 5#
顶尖距离/mm		750、1000、1500、2000	尾座套筒最大行程/mm		150
主轴锥孔		莫氏 6#	刀架最大行程	纵向/mm	650，900，1 400，1 900
主轴转转速范围（$r\cdot min^{-1}$）		10～1400（24 级）		横向/mm	320
进给量范围	纵向（$mm\cdot r^{-1}$）	0.028～6.33（64 级）		刀架溜板/mm	140
	横向（$mm\cdot r^{-1}$）	0.014～3.16（64 级）	电动机功率	主电动机/kW	7.5

2. CA6140 型卧式车床的传动系统

CA6140 型卧式车床的传动系统图由主运动传动链和进给运动传动链组成，如图 3-14 所示。其中进给运动传动链又分为螺纹进给传动链、纵向进给传动链、横向进给传动链以及刀架快速移动传动链。

（1）主运动传动链

CA6140 型车床的主运动传动链的始端件为电动机，末端执行件是机床主轴。其主要作用是把电动机的动力和运动传给主轴，实现主轴的旋转以及启动、停止、变速和换向。

主运动的传动路线是：

1）电动机的运动经由 V 型皮带传至主轴箱内的轴Ⅰ；

2）轴Ⅰ上装有双向多片式摩擦离合器 M_1，用来控制主轴的启动、停止、正传和反转。当 M_1 向左接合时，轴Ⅰ的运动经过齿轮副 56/38 或 51/43 传到轴Ⅱ，使轴Ⅱ得到两级正转转速；当 M_1 向右接合时，轴Ⅰ的运动经过齿轮副 50/34 传到轴Ⅶ，再经过齿轮副 34/30 传到轴Ⅱ，因为轴Ⅰ到轴Ⅱ的传动过程中经过了中间齿轮 $Z34$，使轴Ⅱ得到一级反转转速；当 M_1 处于中间位置时，左、右两端摩擦片均处于放松状态，轴Ⅰ空转，主轴停止转动。

3）轴Ⅱ通过三联滑移齿轮副 39/41，22/58 或 30/50 把运动传给轴Ⅲ，使轴Ⅲ得到 6 级正转转速。

4）轴Ⅲ到主轴Ⅵ的传动有高速和中、低速两条传动路线。当主轴Ⅵ上的齿式离合器 M_2 脱开（齿轮 Z50 处于图示位置）时，轴Ⅲ通过齿轮副 63/50 直接将运动传给主轴Ⅵ，使主轴获得 450～1 400r/min 的高转速；当 M_2 接合（齿轮 Z50 右移）时，轴Ⅲ的运动经过齿轮副 20/80 或 50/50 传给轴Ⅳ，再经过齿轮副 20/80 或 51/50 传给轴Ⅴ，最后经齿轮副 26/58 传给主轴Ⅵ，使主轴获得 10～500r/min 的中、低档转速。

主运动传动链的传动路线表达式为

$$\begin{matrix}\text{电动机}\\ \text{1 450r/min}\end{matrix}-\frac{\phi130}{\phi230}-\text{Ⅰ}-\left[\begin{matrix}\begin{matrix}\overleftarrow{M_1}(\text{左})\\(\text{正传})\end{matrix}-\left[\begin{matrix}\frac{51}{43}\\ \frac{56}{38}\end{matrix}\right]\text{———}\\ \begin{matrix}\overrightarrow{M_1}(\text{右})\\(\text{反转})\end{matrix}-\frac{50}{34}-\text{Ⅶ}-\frac{34}{30}\end{matrix}\right]-\text{Ⅱ}-\left[\begin{matrix}\frac{30}{50}\\ \frac{39}{41}\\ \frac{22}{58}\end{matrix}\right]-$$

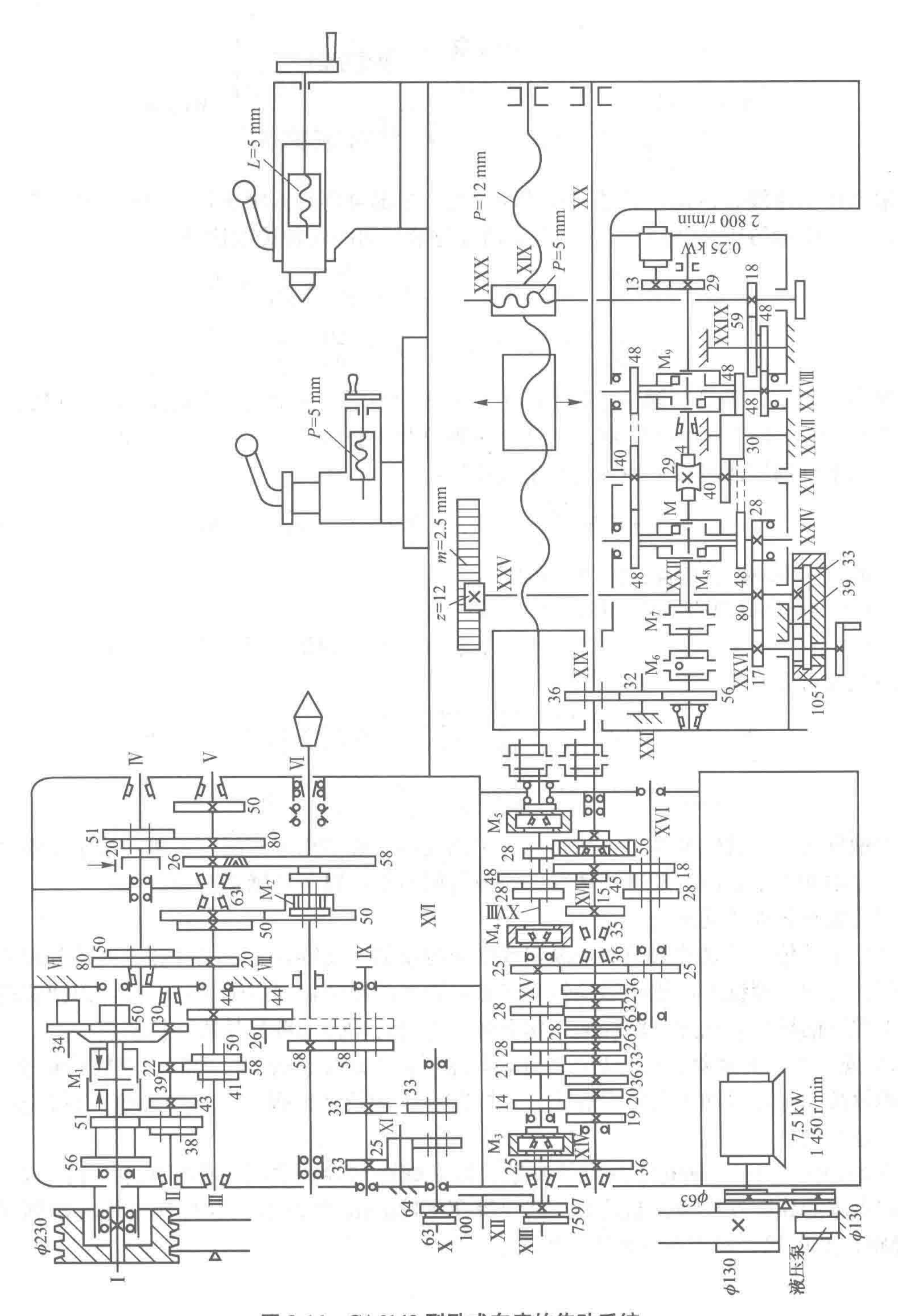


图 3-14 CA6140 型卧式车床的传动系统

$$\mathrm{III}-\left[\begin{array}{l} \text{———————}\dfrac{63}{50}-\overleftarrow{M_2}\ \underline{\qquad\text{(高速分支)}\qquad} \\ -\begin{bmatrix}\dfrac{50}{50}\\ \dfrac{20}{80}\end{bmatrix}-\mathrm{IV}-\begin{bmatrix}\dfrac{51}{50}\\ \dfrac{20}{80}\end{bmatrix}-\mathrm{V}-\dfrac{26}{58}-\overrightarrow{M_2}\ \underline{\text{(中、低速分支)}}\end{array}\right]-\mathrm{VI}\text{(主轴)}$$

根据传动路线表达式，经过高速传动路线，主轴可得到 6 级正转转速；经中、低速传动路线，主轴应能得到 24 级转速，但由于轴Ⅲ与轴Ⅴ间的四种传动比分别为

$$u_1=\frac{50}{50}\times\frac{51}{50}\approx 1 \qquad u_2=\frac{50}{50}\times\frac{20}{80}=\frac{1}{4}$$

$$u_3=\frac{20}{80}\times\frac{51}{50}\approx\frac{1}{4} \qquad u_4=\frac{20}{80}\times\frac{20}{80}=\frac{1}{16}$$

其中 $u_2\approx u_3$，轴Ⅲ与轴Ⅴ之间实际上只有 3 种不同的传动比，因此主轴实际得到的转速级数为 $2\times3\times(2\times2-1)=18$ 级。因此，主轴总共可获得 $6+18=24$ 级不同的转速。

机床主轴的转速可按下列运动平衡式计算：

$$n_{主}=1\,450\times\frac{130}{230}\times(1-\varepsilon)\times u_{\mathrm{I}-\mathrm{II}}\times u_{\mathrm{II}-\mathrm{III}}\times u_{\mathrm{III}-\mathrm{VI}} \tag{3.2}$$

式中 $n_{主}$——机床主轴的转速（r/min）；

ε——V 带传动的滑动系数，$\varepsilon\approx0.02$；

$u_{\mathrm{I}-\mathrm{II}}$，$u_{\mathrm{II}-\mathrm{III}}$，$u_{\mathrm{III}-\mathrm{IV}}$——轴Ⅰ－Ⅱ、轴Ⅱ－Ⅲ、轴Ⅲ－Ⅵ之间的可变传动比。

由上式可以得出

$$n_{\min}=1\,450\times\frac{130}{230}\times\frac{51}{43}\times\frac{22}{58}\times\frac{20}{80}\times\frac{20}{80}\times\frac{26}{58}=10\text{r/min}$$

$$n_{\max}=1\,450\times\frac{130}{230}\times\frac{56}{38}\times\frac{39}{41}\times\frac{63}{50}=1\,400\text{r/min}$$

主轴反转时，其转速高于正转转速。主轴反转一般不用于车削，主要是为了车螺纹时在不断开主轴和刀架之间传动链的情况下快速退回刀架，以节省辅助时间。

（2）进给运动传动链

进给运动传动链是使刀架实现纵向或横向运动的传动链，其始端件和末端件分别为主轴和刀架。在加工螺纹时，进给运动传动链是内联系传动链，即主轴每转一转，刀架移动一个被加工螺纹的导程；在加工圆柱面和端面时，进给运动传动链是外联系传动链。

1）螺纹进给传动链。CA6140 型卧式车床可以用来加工公制、英制、模数制和径节制 4 种标准螺纹，也可以加工大导程螺纹、非标准螺纹和较精密螺纹，这些螺纹可以是左旋的，也可以是右旋的。

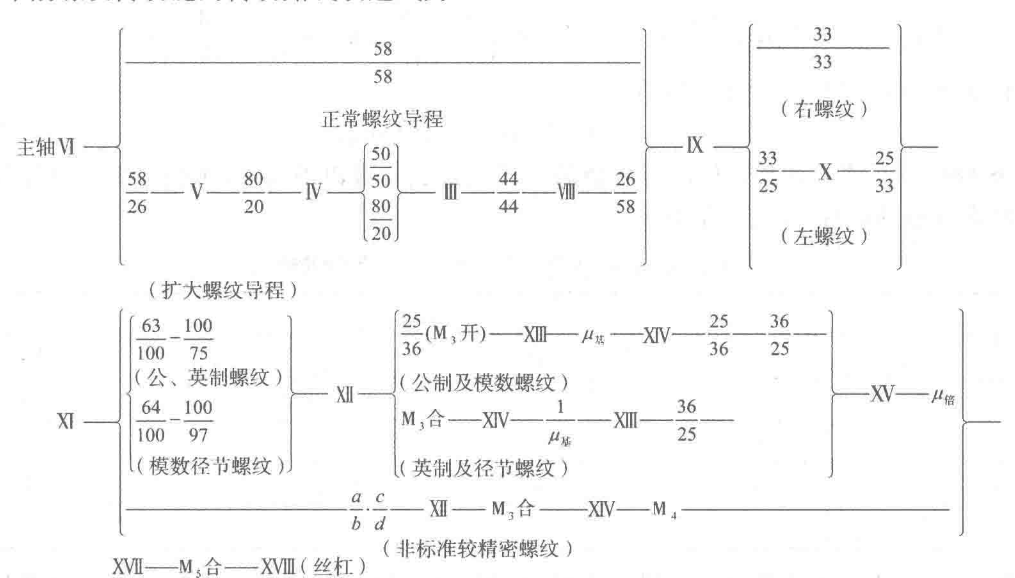
表 3-5 中列出了 4 种标准螺纹的参数，以及螺距与导程之间的换算关系。由于 CA6140 型卧式车床的纵向丝杠为公制螺纹，其导程 $T=12$mm，因此其他 3 种螺纹均应换算成导程（或螺距）的形式，才能在该机床上加工。

表 3-5　标准螺纹参数表

螺纹种类	螺纹参数	螺距/mm	导程/mm
公制	螺距 T/mm	$t=t$	$T=kt$
英制	每英寸牙数 a/（牙・英寸$^{-1}$）	$t_a=\frac{25.4}{a}$	$T_a=\frac{25.4k}{a}$
模数制	模数 m/mm	$t_m=\pi m$	$T_m=k\pi m$
径节制	径节 DP/（牙・英寸$^{-1}$）	$t_{DP}=\frac{25.4\pi}{DP}$	$T_{DP}=\frac{25.4\pi k}{DP}$

注：表中 k 为螺纹头数。

车削螺纹传动链的传动路线表达式为



分析传动系统和传动路线表达式可知：运动从主轴Ⅵ传出后，可经两条路线到达轴Ⅸ，一条是正常螺纹路线，主轴Ⅵ与轴Ⅸ转速相同；另一条是扩大螺纹路线，即主轴Ⅵ转一转，轴Ⅸ转 4 转或 16 转，被车螺纹螺距扩大 4 倍或 16 倍。轴Ⅸ与轴Ⅺ之间是车削左、右旋螺纹的转换机构。从轴Ⅺ经轴Ⅻ再到轴ⅩⅤ之间，通过挂轮机构的搭配和传动路线的选择，可实现车削公制、英制、模数制和径节制螺纹的转换。式中 $u_{基}$ 为轴Ⅷ—ⅩⅣ间滑移齿轮变速机构的传动比，共有 8 种：

$$u_{基1}=\frac{26}{28}=\frac{6.5}{7}\qquad u_{基5}=\frac{19}{14}=\frac{9.5}{7}$$

$$u_{基2}=\frac{28}{28}=\frac{7}{7}\qquad u_{基6}=\frac{20}{14}=\frac{10}{7}$$

$$u_{基3}=\frac{32}{28}=\frac{8}{7}\qquad u_{基7}=\frac{33}{21}=\frac{11}{7}$$

$$u_{基4}=\frac{36}{28}=\frac{9}{7}\qquad u_{基8}=\frac{36}{21}=\frac{12}{7}$$

这 8 种传动比中除 $u_{基1}$ 和 $u_{基5}$（这两个传动比在车公制螺纹时不用）外构成一个等差数列，改变 $u_{基}$ 就可以得到按等差数列排列的基本螺距（或导程），因此这个变速机构通常称

为基本螺距机构，或基本组。

式中，$u_{倍}$——轴XV—XⅦ间滑移齿轮变速机构的传动比，共有4种：

$$u_{倍1}=\frac{18}{45}\times\frac{15}{48}=\frac{1}{8} \qquad u_{倍2}=\frac{28}{35}\times\frac{15}{48}=\frac{1}{4}$$

$$u_{倍3}=\frac{18}{45}\times\frac{35}{28}=\frac{1}{2} \qquad u_{倍4}=\frac{28}{35}\times\frac{35}{28}=1$$

这4种传动比成倍数关系，可用来配合基本组，改变车削螺纹的螺距（或多头螺纹的导程）和增加车削螺纹的种数，因此这个变速机构通常称为增倍机构，或增倍组。

通过 $u_{基}$ 和 $u_{倍}$ 的不同组合，就可以加工出所需规格的标准螺纹。例如，根据传动路线表达式，可得到车削右旋公制螺纹的运动平衡式：

$$T_{公}=kt=1_{主轴}\times\frac{58}{58}\times\frac{33}{33}\times\frac{63}{100}\times\frac{100}{75}\times\frac{25}{36}\times u_{基}\times\frac{25}{36}\times\frac{36}{25}\times u_{倍}\times T \tag{3.3}$$

将 $T=12\text{mm}$ 代入，并化简可得

$$T_{公}=kt=7\times u_{基}\times u_{倍}\ \text{(mm)} \tag{3.4}$$

令 $k=1$，并将 u 基和 u 倍的各数值分别代入上式，可以得到32种公制螺纹的导程值，其中符合标准的只有20种，见表3-6。

表3-6　CA6140型卧式车床车削公制螺纹导程表　　mm

增倍组 $u_{倍}$	基本组 $u_{基}$							
	26/28	28/28	32/28	36/28	19/14	20/14	33/21	36/21
1/8			1			1.25		1.5
1/4		1.75	2	2.25		2.5		3
1/2		3.5	4	4.5		5	5.5	6
1		7	8	9		10	11	12

2）纵向与横向进给传动链。纵向和横向进给传动链一般用于车削内外圆柱面及端面。纵向和横向进给传动链的始端件都是主轴，末端件分别为刀架纵向和横向溜板，其计算位移关系为："主轴转1转—刀架的纵向或横移动量"。纵向和横向进给传动链的传动路线表达式为

$$主轴\ \text{VI}-\begin{bmatrix}公制螺纹传动路线\\英制螺纹传动路线\end{bmatrix}-\text{XVII}-\frac{28}{56}-\text{XIX}-\frac{36}{32}\times\frac{32}{56}-M_6(超越离合器)-M_7(安全离合器)-$$

$$\text{XX}-\frac{4}{29}-\text{XXI}-\begin{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{40}{48}-M_8\uparrow\\\frac{40}{30}\times\frac{30}{48}-M_8\downarrow\end{bmatrix}-\text{XXII}-\frac{28}{80}-\text{XXIII}-齿轮\ Z_{12}-齿条-纵向进给\\\begin{bmatrix}\frac{40}{48}-M_9\uparrow\\\frac{40}{30}\times\frac{30}{48}-M_9\downarrow\end{bmatrix}-\text{XXV}-\frac{48}{48}-\text{XXVI}-\frac{59}{18}-丝杠\ \text{XXVII}-横向进给\end{bmatrix}$$

纵向和横向进给运动传动链从主轴Ⅵ到轴XⅦ之间的传动路线，与车削螺纹的传动路线相同。离合器 M_5 脱开时，运动由轴XⅦ经齿轮副28/56传至光杠XIX，再由光杠经溜板箱中传动机构，把运动传至齿轮齿条机构或丝杠XXⅦ，使刀架作纵向或横向机动进给运动。溜板箱中的齿式离合器 M_8 和 M_9 分别用于控制纵向和横向走刀方向。

进给量的大小可以利用进给箱中的基本螺距机构和增倍机构以及主轴箱中扩大螺距机构来调节，经过不同的车削螺纹传动路线，可以获得不同的纵向和横向进给量。例如，纵向进给运动经正常螺距、公制螺纹传动路线时，其运动平衡式为

$$f_{纵}=1_{主轴}\times\frac{58}{58}\times\frac{33}{33}\times\frac{63}{100}\times\frac{100}{75}\times\frac{25}{36}\times u_{基}\times\frac{25}{36}\times\frac{36}{25}\times u_{倍}\times$$
$$\frac{28}{56}\times\frac{36}{32}\times\frac{32}{56}\times\frac{4}{29}\times\frac{40}{30}\times\frac{30}{48}\times\frac{28}{80}\times\pi\times2.5\times12 \quad (3.5)$$

化简后得

$$f_{纵}=0.71\times u_{基}\times u_{倍}\ \text{(mm/r)} \quad (3.6)$$

变换 $u_{基}$ 和 $u_{倍}$，可得 32 种纵向进给量，其范围为 0.08～1.22 mm/r。

横向进给的传动路线也有 4 条，从主轴Ⅵ到蜗轮轴ⅩⅪ之间的传动路线与纵向机动进给共用，传动丝杠ⅩⅩⅧ驱动刀架作横向进给运动。横向进给量为纵向进给量的一半。

所有纵向和横向进给量的数值，以及各进给量对应的操纵手柄的位置，均可从进给箱上的标牌中查到。

3）刀架快速移动传动链。为了减轻工人劳动强度和缩短辅助时间，机床设有快速移动传动链，以使刀架快速趋近或退离工件。启动溜板箱中的快速电动机（0.25kW，2 800 r/min）时，电机的运动由齿轮副 13/29 传到轴ⅩⅩ，再经过与机动进给相同的路线，传至纵向进给齿轮齿条副或横向进给丝杠，使刀架在纵向或横向快速移动。快速移动的方向仍由溜板箱中双向离合器 M_8 和 M_9 控制。轴ⅩⅩ的左端装有超越离合器 M_6，它能够自动切断进给运动传动链，防止快速移动与进给运动发生干涉。一旦关闭快速电动机，超越离合器 M_6 能使进给运动自动恢复，操纵十分方便。

3. 其他车床简介

（1）立式车床

立式车床的主要结构特点是主轴垂直布置，有一个直径较大的水平的圆形工作台，便于找正和装夹比较笨重的工件。由于工件与工作台的重量均匀地作用在环形的工作台导轨或推力轴承上，大大减轻了主轴及其轴承的承载，因此机床的工作精度容易保持。立式车床适合于加工径向尺寸大而轴向尺寸相对较小，且形状比较复杂的大型或重型零件。

立式车床分单柱式和双柱式两种，如图 3-15 所示。单柱立式车床一般用于加工直径较小（小于 1 600mm）的工件，而双柱立式车床可加工直径较大（一般大于 2 000mm）的工件。

单柱立式车床的工作台 2 上有多条径向 T 形槽，可用来固定工件。工作台由主轴带动，在底座 1 的环形导轨上作旋转运动。立柱 3 上的侧刀架 7 可沿立柱导轨作垂直方向的进给运动，也可沿刀架滑座的导轨作水平的横向进给运动。垂直刀架 4 可沿横梁 5 上的导轨作横向进给及沿刀架滑座的导轨作垂直进给运动，刀架滑座能向两侧倾斜一定角度以加工锥面。垂直刀架上通常装有五角形的转塔刀架，上面可装多组刀具。横梁 9 能在立柱上作上下移动，以便加工不同高度的工件。

（2）转塔车床

图 3-16 所示为转塔车床的外形图。转塔车床的主要结构特点是由转塔刀架 3 取代了卧式车床的尾架，转塔刀架上有 6 个安装刀具的位置，可沿床身导轨作纵向进给运动。根据加工需要，转塔刀架的每一个刀位上可装一把刀具，在一个刀位完成加工后，转塔刀架快速退

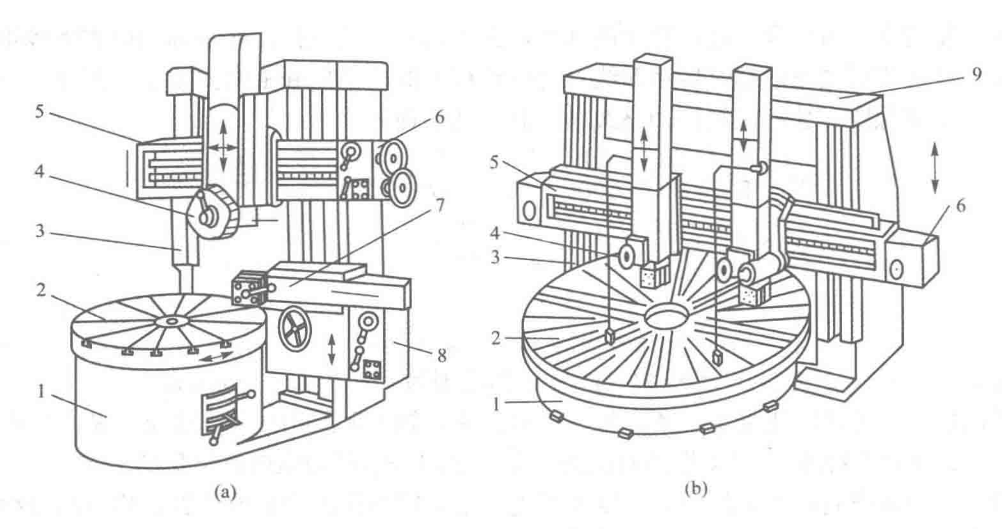


图 3-15　立式车床

(a) 单柱式；(b) 双柱式

1—底座；2—工作台；3—立柱；4—垂直刀架；5—横梁；
6—垂直刀架进给箱；7—侧刀架；8—侧刀架进给箱；9—顶梁

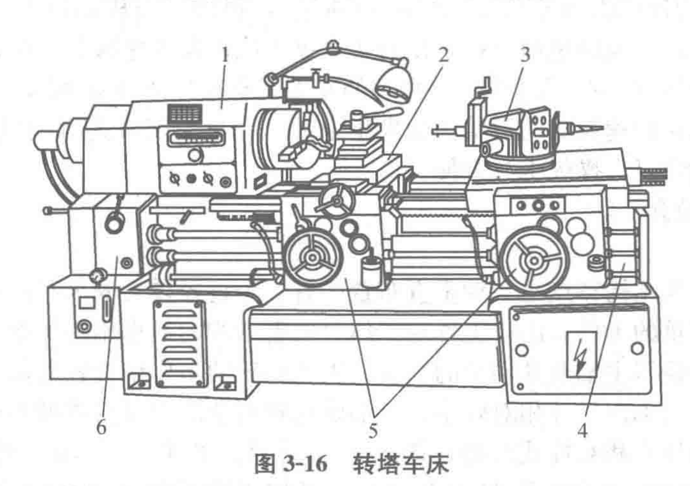


图 3-16　转塔车床

1—主轴箱；2—前刀架；3—转塔刀架；4—床身；5—溜板箱；6—进给箱

回原位，转动 60°，换下一个刀位进行加工。前刀架 2 可作纵向进给，也可作横向进给。转塔车床主要用于车削外圆、端面或沟槽。

(3) 自动车床

自动车床是指经装料和调整后，能按一定程序自动完成预定的工作循环，重复加工同一种工件的车床。除装卸工件以外均能自动完成工作循环的车床称为半自动车床。自动车床具有自动加工、加工速度快、加工精度准确可靠、复杂零件一次加工成型、生产效率高等特点，适用于仪器仪表、钟表、电子零件、接插件、文具、五金卫浴、机电、汽车、摩托车等行业成批加工尺寸较小、形状复杂的零件。

自动车床一般采用凸轮和挡块来自动控制刀架、主轴箱的运动和其他辅助运动，机床工作稳定可靠，应用广泛。但当工件改变时，需要重新设计和制造凸轮，并花费较多时间调整机床，故只适用于大批量生产领域。

按主轴数目，自动车床分单轴和多轴两大类。单轴自动车床主要有单轴纵切、单轴转塔和单轴横切 3 种形式；多轴自动车床则主要有顺序作业和平行作业两种。单轴纵切自动车床以加工冷拔棒料为主，工件除旋转运动外，还随主轴箱作纵向进给，刀架作横向切入和进给，可获得较高的加工精度，图 3-17 为单轴纵切自动车床的外形图。这种机床通常还配有钻孔、铰孔和切螺纹的附件，可以车削外圆、锥面、成形表面、端面，钻、扩、铰孔，加工内、外螺纹，切槽和切断等。单轴转塔自动车床具有转塔刀架和多个横向刀架，可用多种刀

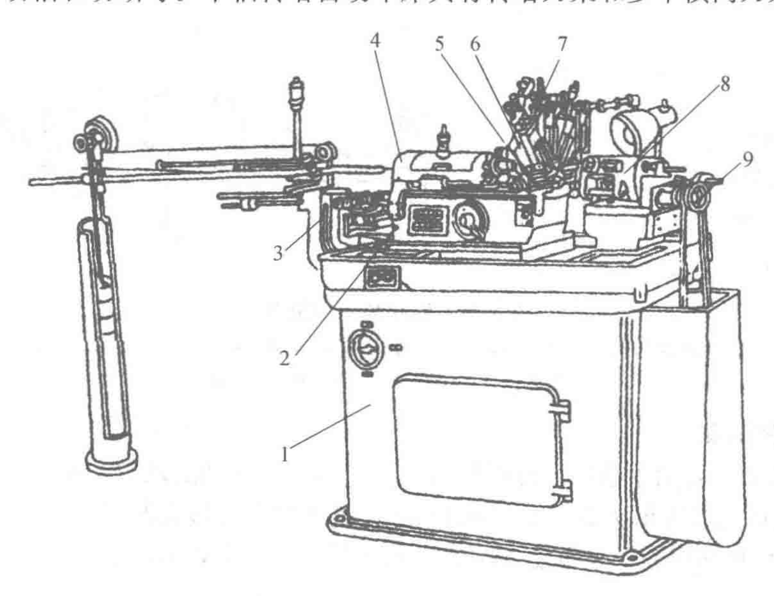


图 3-17　单轴纵切自动车床

1—底座；2—床身；3—送料装置；4—主轴箱；5—天平刀架；6—中心架；
7—上刀架；8—三轴钻铰刀附件；9—分配轴

具顺序切削，适合于加工形状复杂、尺寸较小的零件。单轴横切自动车床的主轴箱和刀架均不作纵向进给运动，而由成形刀具的横向进给运动完成切削加工，仅适用于加工形状简单、尺寸较小的销、轴类零件。顺序作业多轴自动车床的多根主轴装在可周期性转位的主轴鼓内，坯料顺序经过各工位完成不同工序的加工，并在最后一个工位切断或卸下，适合于加工形状较为复杂的工件。平行作业多轴自动车床有位置固定的数根主轴，可同时在几个工位进行相同工序的加工，适合于大批量加工形状简单的工件。

3.4.3　磨床

用磨料或磨具（如砂轮、砂带、油石、研磨料等）作为工具对工件表面进行切削加上的机床，统称为磨床。通常，磨具的旋转为主运动，工件的移动为进给运动。磨床可以磨削平面，内、外圆柱面和圆锥面，以及螺纹、齿面和各种成形表面，工艺应用范围广泛（见图 3-18），是对淬硬钢件或高硬度材料零件的主要加工设备。除了用作精加工外，磨床也可用来进行高效率的粗加工或一次完成粗、精加工。磨床的种类主要有外圆磨床、内圆磨床、平面磨床、工具磨床以及专门加工曲轴、凸轮轴等特定零件的各种专门化磨床。

外圆磨床的类型主要有普通外圆磨床、万能外圆磨床、无心外圆磨床、宽砂轮外圆磨床和端面外圆磨床等。

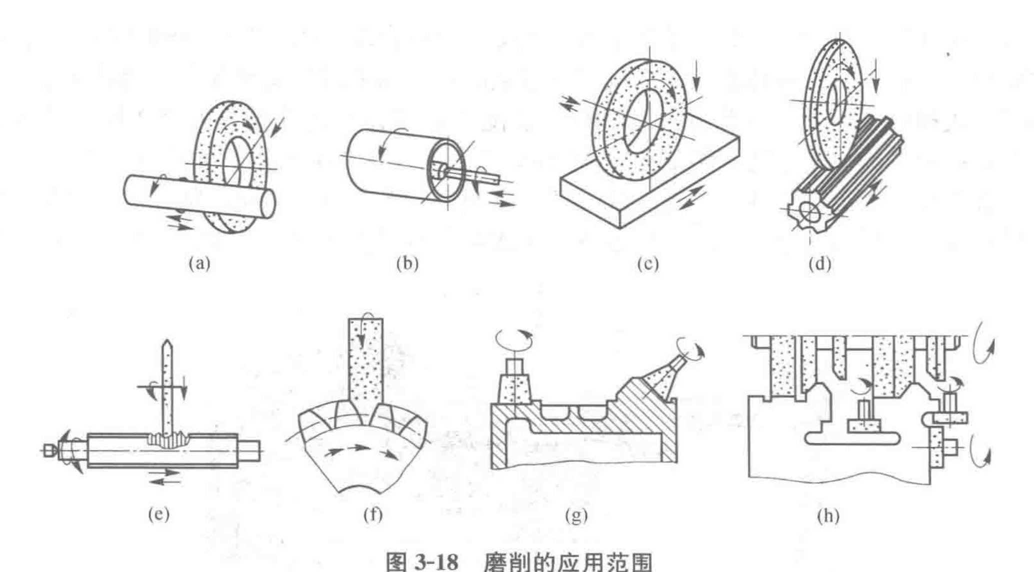


图 3-18 磨削的应用范围

(a) 磨外圆；(b) 磨内孔；(c) 磨平面；(d) 磨花键；(e) 磨螺纹；
(f) 磨齿轮；(g) 磨导轨；(h) 组合磨导轨面

1. 万能外圆磨床

万能外圆磨床主要用于磨削内外圆柱面、圆锥面、阶梯轴的轴肩和端面，可获得 IT6～IT7 级精度，表面粗糙度值为 R_a1.25～0.08μm，其主参数为最大磨削直径 320mm。

图 3-19 所示为 M1432A 型万能外圆磨床的外形图。它主要由以下几个部分组成：

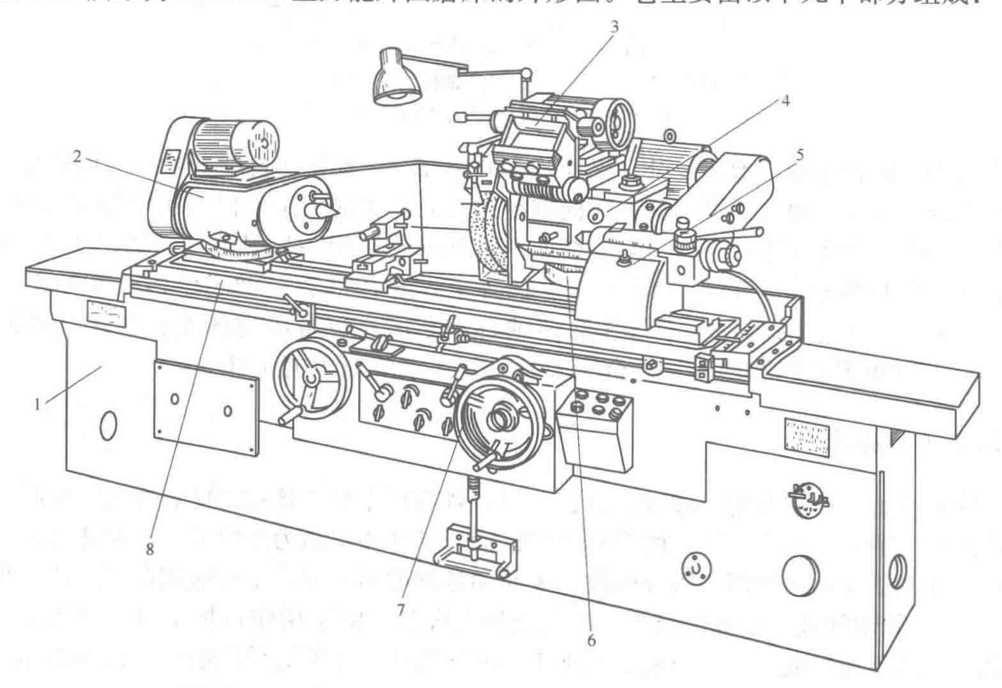


图 3-19 M1432A 型万能外圆磨床

1—床身；2—头架；3—内圆磨具；4—砂轮架；5—尾座；6—滑鞍；7—横向进给手轮；8—工作台

1）床身。机床的基础支承件，用以支承机床的各个部件，其内部有油池和液压系统。

2）工作台。由上工作台和下工作台组成。上工作台可相对于下工作台在水平面内回转一定的角度，用以磨削锥度较小的长圆锥面。工作台上装有头架和尾座，随工作台一起沿床身的纵向导轨作往复移动。

3）头架。用来装夹工件并带动工件旋转。头架在水平面内转动一定角度时，可磨削短圆锥面

4）尾座。尾座上的后顶尖与头架上的前顶尖一起支承工件。

5）滑鞍。其上装有砂轮架、内圆磨具及横向进给手轮。转动横向进给手轮能使滑鞍和砂轮架作横向运动。

6）砂轮架。用以支承并传动砂轮主轴高速旋转。砂轮架的回转角度为±30°，调整一定角度，可以磨削锥度较大的短锥面。

7）内圆磨具。用于支承磨削内孔的砂轮主轴。将内圆磨具放下并固定后，启动内圆磨具电机，即可磨削夹紧在卡盘中的工件内孔，此时电气互锁装置使砂轮架不能作快进或快退运动。

万能外圆磨床的典型加工方式如图 3-20 所示。图 3-20（a）所示为以顶尖支承工件，用纵磨法磨削外圆柱面；图 3-20（b）所示为工作台调整一定角度，用纵磨法磨削长圆锥面；图 3-20（c）所示为砂轮架偏转一定角度，以切入法磨削短圆锥面；图 3-20（d）所示为头架偏转一定角度，以纵磨法磨削内圆锥面。

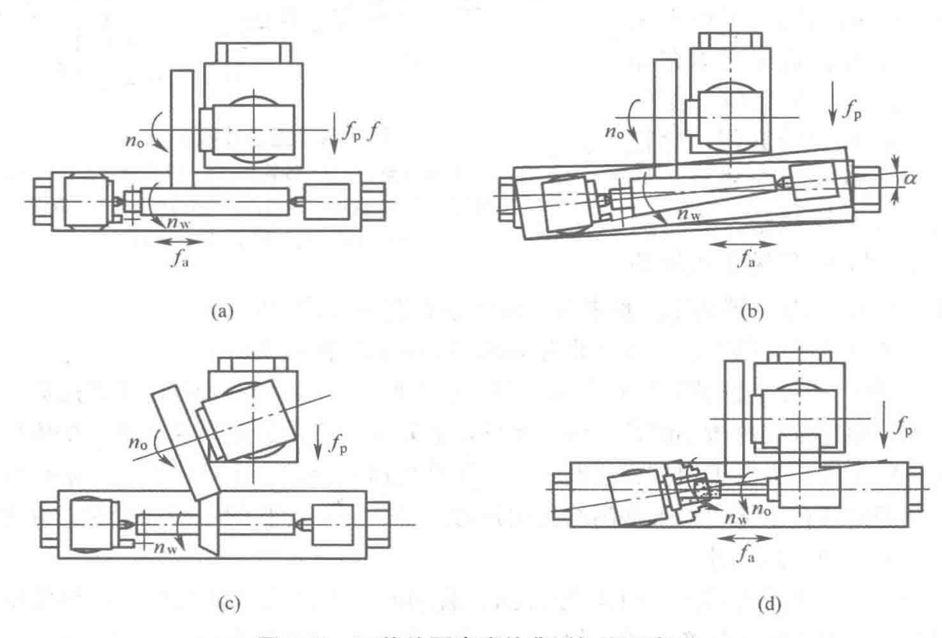


图 3-20　万能外圆磨床的典型加工示意图

（a）以顶尖支承工件；（b）磨削长圆锥面；（c）磨削短圆锥面；（d）磨削内圆锥面

从万能外圆磨床的几种典型加工方式可知，机床应有以下几种运动：

1）主运动。砂轮旋转主运动 n_0 由电动机经带传动驱动砂轮主轴作高速转动，其中磨外圆和磨内圆的主运动由两台电动机分别驱动，并设有互锁装置。

2）进给运动。包括工件旋转运动 n_w、工件纵向往复移动 f_a 和砂轮架横向移动 f_p。纵磨时，横向进给移动是周期性的间歇进给；切入法磨削时，横向进给是连续的。

3）辅助运动。有砂轮架的横向快进、快退和尾座套筒的退回。

2. 普通外圆磨床

同规格的普通外圆磨床与万能外圆磨床的结构与外形基本相同，主要区别是普通外圆磨床的头架和砂轮架都不能绕垂直轴调整角度；头架主轴直接固定在箱体上不能转动，工件只能用顶尖支承进行磨削；没有内圆磨具。因此，普通外圆磨床只能磨削外圆柱面、锥度较小的圆锥面以及台肩和端面。

虽然普通外圆磨床的结构在一定程度上限制了其工艺范围，但由于减少了主要部件的结构层次，简化了机床结构，机床刚度有所增加；头架主轴固定不动，工件直接支承在固定顶尖上，头架主轴组件的刚度及工件的旋转精度均有所提高。

3. 无心外圆磨床

无心外圆磨床一般简称无心磨床，图 3-21 所示为无心外圆磨床的外形图。磨削时，工件不用顶尖或卡盘定心，直接支承在导轮与托板之间，由导轮驱动工件旋转。砂轮高速旋转磨削，导轮以较慢速度与砂轮同向旋转，带动工件旋转作圆周进给。砂轮宽度≤250mm 时，一般装于主轴端部；宽度＞250mm 时，则装于主轴中部，砂轮最大宽度可达 900 mm。

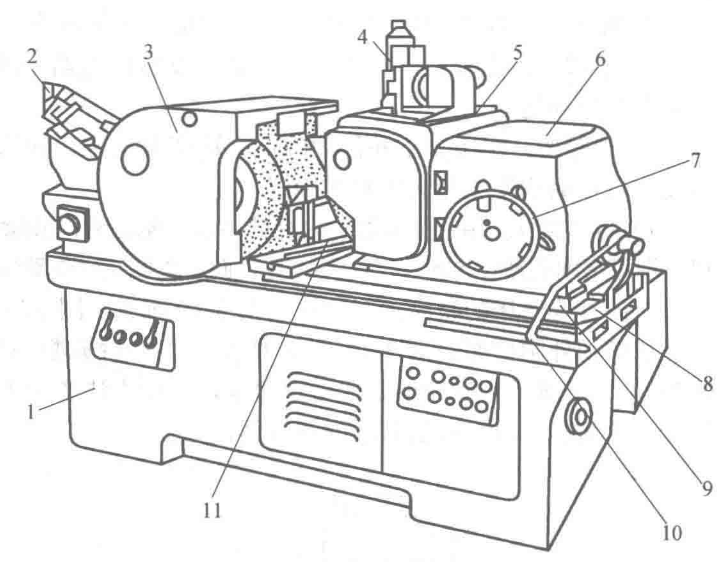


图 3-21 无心外圆磨床

1—床身；2—砂轮修整器；3—砂轮架；4—导轮修整器；5—转动体；6—座架；7—微量进给手柄；8—回转底座；9—滑板；10—快速进给手柄；11—支座

无心外圆磨床的磨削方法主要有贯穿磨削法和切入磨削法两种。

图 3-22 所示是贯穿磨削法的工作原理图。磨削时，工件从机床前面放到托板上并推入磨削区，调整导轮轴线的微小倾角可带动工件沿砂轮轴线方向进给，从导轮与磨削砂轮之间穿过并由机床后端出去。采用贯穿法磨削时，工件可以一个接一个地连续进入磨削区，生产效率高且易于实现自动化，适于磨削细长圆柱形工件、无中心孔的短轴和套类工件等，但不能磨削带台阶的圆柱形工件。

图 3-23 所示是切入磨削法的工作原理图。磨削时，工件支承在托板上，导轮轴线的倾斜角度很小，仅用于使工件产生较小的轴向推力，顶住定位挡块而得到可靠的轴向定位，工件与导轮向磨削轮作横向切入进给运动，或由磨削轮向工件进给。切入磨削法可用于磨削带轴肩或凸台的工件以及圆锥体、球体或其他回转体工件。

与普通外圆磨床相比，无心外圆磨床加工时无须退刀，可连续加工，生产效率高，适用于大量生产；不需打中心孔，且易于实现上、下料自动化；托架和导轮定位机构比普通外圆磨床顶尖、中心架机构支承刚性好，切削量可以较大，并有利于细长轴类工件的加工，易于实现高速磨削和强力磨削。但是，无心外圆磨床无保证磨削表面与非磨削表面相对位置精度的机构，磨削周

向断续的外表面时圆度较差；机床调整技术难度较大，费时费力，不适宜小批及单件生产。

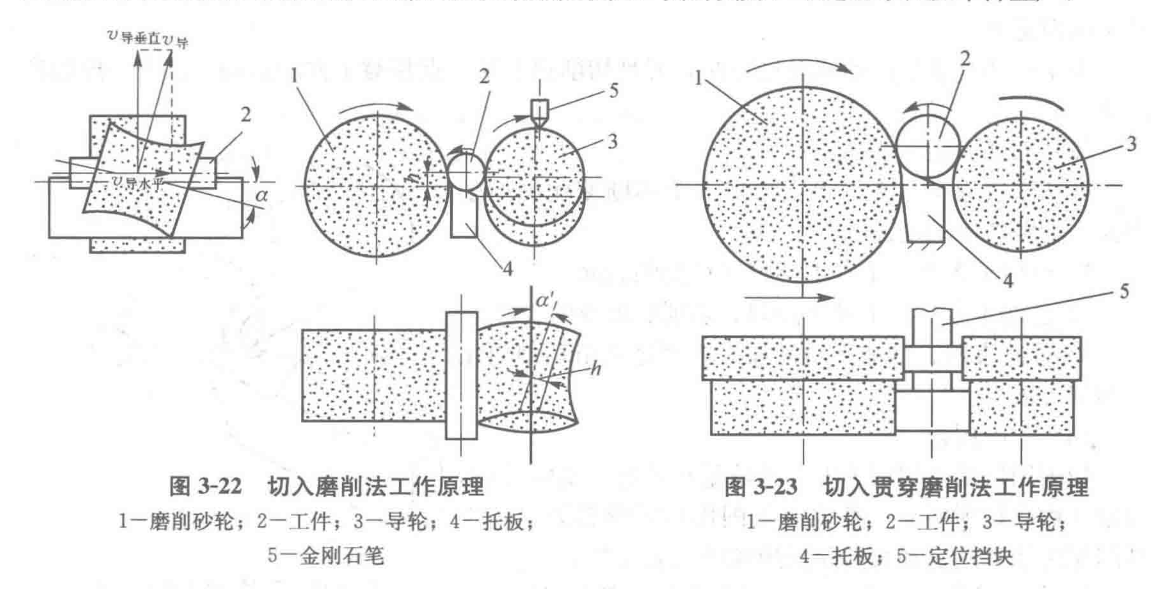


图 3-22　切入磨削法工作原理

1—磨削砂轮；2—工件；3—导轮；4—托板；5—金刚石笔

图 3-23　切入贯穿磨削法工作原理

1—磨削砂轮；2—工件；3—导轮；4—托板；5—定位挡块

3.5　轴类零件加工刀具

3.5.1　金属切削的基础知识

金属切削加工是利用金属切削刀具切除工件上多余的金属材料，从而获得具有图纸要求的尺寸精度、形状位置精度和表面质量的机械零件的加工方法。

1. 切削运动与切削用量

(1) 切削运动

在切削加工过程中，刀具和工件之间的相对运动称为切削运动。切削运动按其功用又可分为主运动和进给运动，如图 3-24 所示。

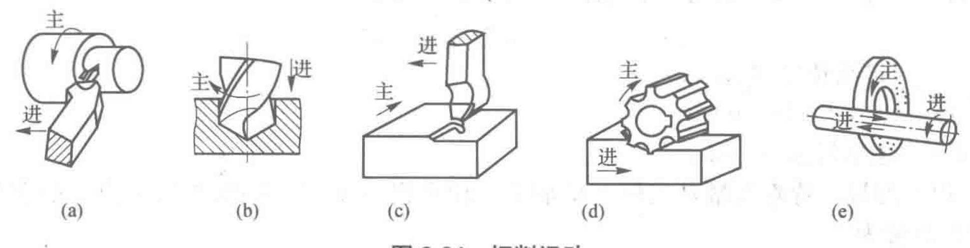


图 3-24　切削运动

(a) 车外圆；(b) 钻孔；(c) 刨平面；(d) 铣平面；(e) 磨外圆

1) 主运动。主运动是切除金属材料所必需的基本运动。在切削过程中，主运动有且只能有一个，其切削速度最高、消耗功率最大。主运动可以是旋转运动，如车削、镗削时主轴的运动；也可以是直线运动，如刨削、拉削时刀具的运动。

2) 进给运动。进给运动是使新的金属不断投入切削的运动。进给运动一般速度较低、消耗功率较少，可能有一个或几个，也可以没有。进给运动可以是连续进行的，如车削时，

车刀平行于工件轴线的纵向运动是连续的运动；也可以是间歇的，如刨削时，刀具的横向移动是间隙运动。

当主运动与进给运动同时进行时，刀具切削刃上某一点相对工件的运动又称为合成切削运动。

（2）加工表面

在切削过程中，工件上会形成 3 个不断变化的切削表面，如图 3-25 所示。

1）待加工表面。工件上即将被切削的表面。

2）已加工表面。工件上经刀具切削后形成的表面。

3）过渡表面。已加工与待加工表面之间由切削刃正在切削的表面。

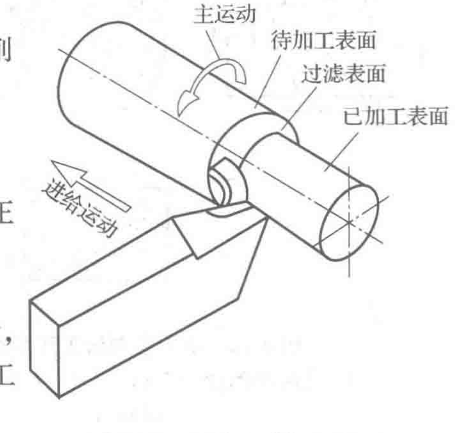


图 3-25　工件上的加工表面

（3）切削用量

切削用量是指切削速度、进给量和背吃刀量的总称，通常又称为切削用量三要素。切削用量是调整刀具与工件间相对运动速度和相对位置所需的工艺参数。

1）切削速度。切削速度是切削刃上选定点相对于工件的主运动的瞬时线速度，即主运动的线速度。车削时计算公式为

$$v_c = \frac{\pi d n}{1\,000} \tag{3.7}$$

式中　v_c——切削速度（m/s）；

d——刀具或工件的最大直径（mm）；

n——主运动转速（r/s）。

计算时应以最大的切削速度为准。如车削时应以待加工表面直径计算，因为该直径上的速度最大。

2）进给量。进给量是刀具在进给运动方向上相对于工件的位移量，用刀具（或工件）每转（或每行程）的位移量来表示。进给速度是指切削刃上选定点相对于工件在进给方向的瞬时速度。进给量的大小也反映了进给速度，其关系式为

$$v_f = fn \tag{3.8}$$

式中　v_f——进给速度（mm/s）；

f——进给量（mm/r）；

n——主轴转速（r/s）。

3）背吃刀量。背吃刀量是工件上待加工表面和已加工表面间的垂直距离。如车削外圆时的背吃刀量为

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2} \tag{3.9}$$

式中　a_p——背吃刀量（mm）；

d_w——待加工表面直径（mm）；

d_m——已加工表面直径（mm）。

2. 刀具的几何角度

金属切削加工刀具的种类繁多，各种刀具的结构也相差很大，但刀具切削部分的几何形

状和参数却是相似的。不论刀具的结构如何复杂，它们的切削部分总是可以看成是以外圆车刀为基本形态演变而来的。

（1）刀具切削部分的组成

外圆车刀是最基本、最典型的刀具，由刀头和刀杆组成，如图3-26所示。刀杆是刀具的夹持部位，刀头是刀具的切削部分。切削部分的组成如下所述。

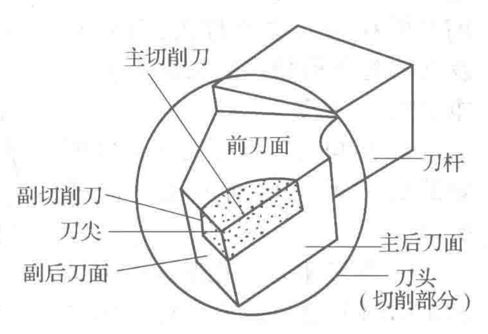


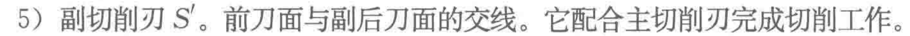
图3-26　外圆车刀的组成

1）前刀面 A_γ。又称前面，是切屑流过的表面。

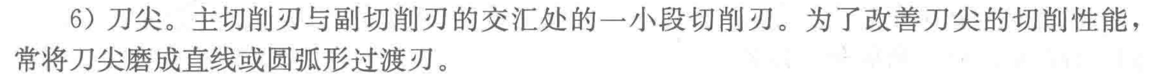
2）主后刀面 A_α。又称主后面，是与工件上过渡表面相对的表面。

3）副后刀面 A_α'。又称副后面，是与工件上已加工表面相对的表面。

4）主切削刃 S。前刀面与后刀面的交线。它承担主要的切削工作。



5）副切削刃 S'。前刀面与副后刀面的交线。它配合主切削刃完成切削工作。



6）刀尖。主切削刃与副切削刃的交汇处的一小段切削刃。为了改善刀尖的切削性能，常将刀尖磨成直线或圆弧形过渡刃。

（2）刀具标注角度参考系

在刀具设计、制造、刃磨和测量时，用于定义刀具几何参数的参考系称为刀具标注角度参考系或刀具静止参考系。为了方便讨论，建立标注角度参考系时不考虑进给运动的大小，并假定刀具的安装基准面平行或垂直于参考系的平面，且刀尖与工件中心轴线等高。图3-27所示为刀具的正交平面参考系。

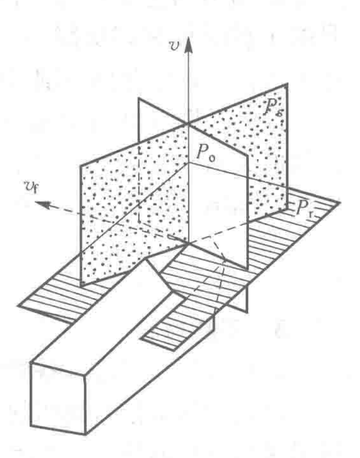
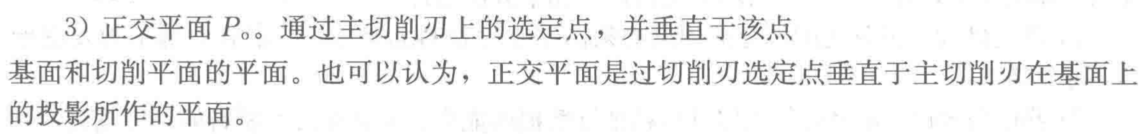


图3-27　正交平面参考系

1）基面 P_r。通过主切削刃上的选定点，并垂直于该点切削速度方向的平面。车刀切削刃上各点的基面都平行于车刀的安装面（即底面）。安装面是刀具制造、刃磨和测量时的定位基准面。

2）切削平面 P_s。通过主切削刃上的选定点，与主切削刃相切，并垂直于该点基面的平面。在无特殊情况下，切削平面即是主切削平面。



3）正交平面 P_o。通过主切削刃上的选定点，并垂直于该点基面和切削平面的平面。也可以认为，正交平面是过切削刃选定点垂直于主切削刃在基面上的投影所作的平面。

（3）刀具的标注角度

在刀具标注角度参考系中定义的角度称为刀具的标注角度。图3-28所示为外圆车刀在正交平面参考系中角度的标注。

1）主偏角 κ_r。在基面内测量的主切削平面与假定工作平面之间的夹角。也是主切削刃在基面上的投影与进给运动方向之间的夹角。

2）刃倾角 λ_s。在切削平面内测量的主切削刃与基面间的夹角。在主切削刃上，刀尖为最高点时 λ_s 为正值，当刀尖是最低点时 λ_s 为负值，主切削刃与基面平行时 λ_s 为零。

3）前角 γ_o。在正交平面内测量的前刀面和基面之间的夹角。前刀面在基面之下称为正前角，反之称为负前角，前刀面在基面重合时 γ_o 为零。

4）后角 α_o。在正交平面内测量的后刀面与切削平面之间的夹角。

5）副偏角 κ_r'。在基面内测量的副切削平面与假定工作平面之间的夹角。

6）副后角 α_o'。在正交平面内测量的副后面与切削平面之间的夹角。

以上 6 个基本角度中，主偏角、刃倾角、前角和后角可以确定主切削刃的空间位置。由于刀具的主切削刃和副切削刃在同一个前刀面上，因此副切削刃的空间位置由副偏角和副后角即可确定。

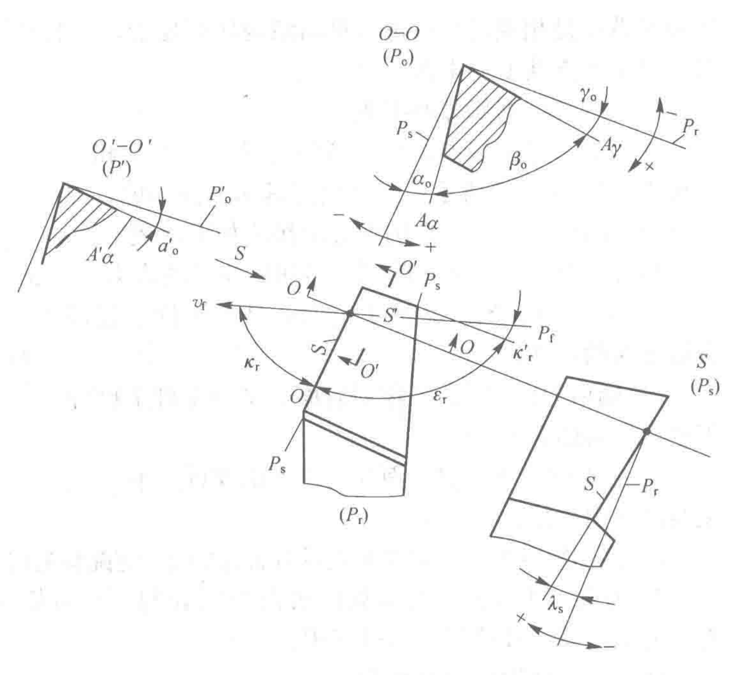


图 3-28　外圆车刀在正交平面参考系中角度的标注

此外，图 3-28 中还有两个派生的角度：楔角 β_o 和刀尖角 ε_r。楔角 β_o 是前刀面和后刀面之间的夹角，刀尖角 ε_r 是主切削平面与副切削平面之间的夹角。这两个角度在刀具工作图中不必标出，可用下式计算：

$$\beta_o = 90° - (\gamma_o + \alpha_o) \tag{3.10}$$

$$\varepsilon_r = 180° - (\kappa_r + \kappa_r') \tag{3.11}$$

3. 刀具材料

（1）刀具材料应具备的性能

刀具材料是指刀具切削部分的材料。刀具的切削性能的取决于刀具材料、切削部分的几何形状和刀具的结构。刀具材料的选择对刀具的使用寿命、工件的加工质量、生产效率和加工成本都有极大的影响。刀具材料应具备以下几个方面的性能：

1）高的硬度。刀具切削部分的硬度必须高于工件材料的硬度，一般在室温下刀具硬度应高于 60HRC。

2）高的耐磨性。耐磨性是指刀具材料抵抗磨损的能力。一般来说，材料的硬度越高，含有耐磨碳化物颗粒越多，晶粒越细，分布越均匀，其耐磨性越好。

3）足够的强度和韧性。切削时，刀具切削部分材料承受着较大的切削力、冲击和振动。为了防止刀具崩刃和断裂，必须具有足够的强度和韧性。

4）较高的耐热性。耐热性是指材料在高温下仍保持高硬度的能力，一般用红硬性或高温硬度来表示。刀具材料的耐热性越好，允许的切削速度越高。

5）良好的工艺性能。为了便于刀具的制造和刃磨，刀具切削部分材料应有良好的锻造、焊接、热处理、切削加工和磨削加工等工艺性能。

(2) 常用刀具材料

常用的刀具材料主要有工具钢（碳素工具钢和合金工具钢）、高速钢、硬质合金、陶瓷、立方氮化硼和金刚石等。碳素工具钢、合金工具钢因耐热性差，只能用于制造手工或低速切削的刀具；陶瓷、金刚石和立方氮化硼等材料往往因为脆性较大或成本太高，应用场合有限；目前刀具材料中应用最多的是高速钢和硬质合金。常见刀具材料的种类和力学性能见表3-7。

表 3-7　常用刀具材料的物理力学性能

材料种类 \ 材料性能		硬度 HRC (HRA) [HV]	抗弯强度 GPa	冲击韧度 kJ·m⁻²	热导率 W·(m·K)⁻¹	耐热性 ℃
碳素工具钢		60～65 (81～84)	2.45～2.74	—	67.2	200～250
合金工具钢		60～65 (81～84)	2.4	—	41.8	300～400
高速钢		63～70 (83～86)	1.96～5.88	98～588	16.7～25.1	600～700
硬质合金	钨钴类	(89～92)	1.08～2.34	19～56	75.4～87.9	900
	钨钛钴类	(89～92.5)	0.9～1.4	3～7	20.9～62.8	900
陶瓷	氧化铝陶瓷	(>91)	0.45～0.55	5～12	19.2	1 200
	氧化物碳化物系陶瓷	(93～94)	0.55～0.65	—	—	1 100
	氮化硅陶瓷	(91～93)	0.75～0.85	—	37.8	1 300
立方氮化硼		[6 000～8 000]	1.0	—	75.5	1 000～1 200
金刚石		[10 000]	0.21～0.49	—	146.5	700～800

1) 高速钢。高速钢的碳的质量分数为0.7%～1.65%，并加入大量的铬、钨、钼、钒等合金元素，有些含有总量小于2%的铝、铌、钛、硅及稀土元素等，属于高碳高合金钢。高速钢的常温硬度可达HRC63～65，红硬性达600～660℃，抗弯强度为33GPa。此外，高速钢还具有良好的淬透性和加工工艺性，适用于制造各种小型及形状复杂的刀具，如铣刀、拉刀、钻头、丝锥、成型刀具、齿轮刀具等。

按用途不同，高速钢可分为通用型高速钢和高性能高速钢。表3-8列举了几种常用高速钢的种类、牌号、力学性能和用途。

通用型高速钢的含碳量一般在0.7%～0.9%，允许的切削速度为40～60 m/min。通用型高速钢具有硬度较高、耐磨性和韧性较好、工艺性能良好的特点，广泛应用于各种复杂形状刀具的制造，约占高速钢总量的75%～80%。通用型高速钢可分为钨系和钨钼系钢两类，常用牌号有W18Cr4V和W6Mo5Cr4V2。

W18Cr4V具有较好的综合机械性能，刃磨工艺性好，可制造各种复杂刀具。但由于强度和韧性较差，不宜制作大截面的刀具和成形刀具。6Mo5Cr4V2的热塑性好，抗弯强度比W18Cr4V高10%～15%，韧性高50%～60%，适于制造尺寸较大或承受较大冲击的刀具，常用于制造热轧刀具，如热轧麻花钻等。

表 3-8 常用高速钢的种类、牌号、力学性能和用途

种类		牌号	常温硬度 HRC	高温硬度（600℃）HRC	抗弯强度 GPa	冲击韧性 $MJ \cdot m^{-2}$	用途
通用型高速钢	钨系高速钢	W18Cr4V（W18）	63～66	48.5	2.9～3.3	0.17～0.31	加工中等硬度和软材料的车刀、丝锥、钻头、铣刀等
	钼系高速钢	W6Mo5Cr4V2（M2）	63～66	47～48	3.4～3.9	0.39～0.45	要求耐磨性和韧性配合的中速切削刀具如丝锥、钻头等
高性能高速钢	钴高速钢	W2Mo9Cr4VCo8（M42）	67～70	55	2.6～3.7	0.22～0.29	加工高硬度材料、承受高切削力的各种刀具，如铣刀、滚刀、车刀等
	铝高速钢	W6Mo5Cr4V2Al（501）	67～69	54～55	2.8～3.8	0.22～0.29	加工各种难加工材料（如高温合金、不锈钢等）的车刀、镗刀、钻头

高性能高速钢是指在通用型高速钢中添加钴、钒、铝等合金元素，进一步提高其耐磨性和耐热性的新型高速钢，切削速度可达 90m/min，主要用于高温合金、钛合金、不锈钢等难加工材料的加工。

钴高速钢是在普通高速钢中加入钴，以提高钢的高温硬度和抗氧化能力，其典型牌号有 W2Mo9Cr4VCo8 等，其切削性能良好，可用于切削高温合金、不锈钢等难加工材料。铝高速钢是在普通高速钢中加入少量的铝，可提高钢的高温硬度、热塑性和韧性，典型牌号有 W6Mo5Cr4V2Al 等，其力学性能和切削性能与钴高速钢相当，可加工性好，且价格低廉，但其对热处理工艺要求较高，磨削性能也较差。

2）硬质合金。硬质合金是将一种或几种难熔的、高硬度的金属碳化物（WC，TiC，TaC，NbC 等）粉末与粘结剂（Co，Ni，Mo 等）混合，经高压成型、高温烧结而成的粉末冶金材料。常温硬度为 HRA89～93，切削温度可达 800～1 000℃，可切削 HRC50 左右的硬质材料，与高速钢刀具相比，其切削速度可提高 4～10 倍，刀具寿命高可延长 5～80 倍。但是硬质合金材料的抗弯强度低，冲击韧性差，不能用一般的切削方法加工，只能采用电加工（如电火花、线切割、电解磨削等）或用砂轮磨削。

硬质合金按其成分和性能特点，可分为钨钴类（YG 类）、钨钛钴类（YT 类）和钨钛钽（铌）类（YW 类）硬质合金 3 种。

钨钴类硬质合金的主要化学成分是碳化钨和钴，常用牌号有YG3，YG6，YG8 等。钨钴类硬质合金强度高，韧性好，导热性能好，适宜切削切屑呈崩碎块粒状的铸铁和脆硬的非金属材料。钨钴类硬质合金的刃磨性较好，刃口可以磨得较为锋利，故切削有色金属及其合金时效果良好。此外，由于其韧性好，导热系数较大，还可用来加工不锈钢、高温合金、钛合金等难加工材料。

钨钛钴类硬质合金的主要化学成分是碳化钨、碳化钛和钴，常用牌号有 YT5，YT15，YT30 等。由于加工钢件时塑性变形、刀屑接触长度及磨擦大，切削温度高，钨钛钴类硬质合金硬度高、耐磨性好，特别是耐热性好的特点正好满足加工要求，因此这类硬质合金适宜

加工切屑呈带状的普通碳素钢及合金钢等塑形较好的材料。

钨钛钽（铌）类硬质合金是在普通硬质合金中加入碳化钽或碳化铌，又称通用硬质合金或万能硬质合金，常用牌号有 YW1，YW2 等。碳化钽或碳化铌的加入，提高了硬质合金的韧性和耐热性，使其具有良好的综合切削性能，主要用于加工耐热钢、高锰钢、不锈钢等难加工材料，也可以加工普通碳钢和铸铁材料。

硬质合金主要用于制造高速切削或加工高硬度材料的刀具，如车刀、铣刀等，合金中钴的质量分数越高，韧性越好。因此，用韧性好的钨钴类硬质合金制造的刀具适宜加工脆性材料，而硬度高的钨钛钴类硬质合金制造的刀具适宜加工塑性材料。在同一类硬质合金中，含钴量较高者适宜制造粗加工刀具，反之则适宜制造精加工的刀具。因此，不同种类的硬质合金性能也有所差异，应根据具体条件合理选用，才能发挥硬质合金的最大效能。表 3-9 是一些常用硬质合金的性能和应用范围。

表 3-9　常用硬质合金的性能特点和应用范围

类型	牌号	性能特点	应用范围
钨钴类	YG3X	属细晶粒合金，是 YG 类合金中耐磨性最好的一种，但冲击韧性较差	适于铸铁、有色金属及其合金的精镗、精车等，亦用于合金钢、淬硬钢及钨、钼材料精加工
	YG6X	属细晶粒合金，其耐磨性较 YG6 高，而使用强度接近于 YG6	适用于冷硬铸铁、合金铸铁、耐热钢及合金钢加工，亦适于普通铸铁的精加工并可用于制造仪器仪表工业的小型刀具和小模数滚刀
	YG6	耐热性较高但低于 YG6X，YG3X，韧性高于 YG6X，YG3X，可使用较 YG8 高的切削速度	适于铸铁、有色金属及其合金与非金属材料连续切削时的粗车，间断切削时的半精车、精车。小断面精车，粗车螺纹，旋风车螺纹，连续断面的半精铣与精铣，孔的粗扩与精扩
	YG8	使用强度较高，抗冲击和抗振性能较 YT6 好，耐用度和允许的切削速度较低	适于铸铁、有色金属及其合金与非金属材料加工中，不平整断面和间断切削时的粗车、粗刨、粗铣，一般孔和深孔的钻孔与扩孔
	YS2 (YG10H)	属超细晶粒合金，耐磨性较好，抗冲击和抗振性能高	适于低速粗车、铣削耐热合金及钛合金、作切断刀及丝锥等
钨钛钴类	YT5	在 YT 类合金中，强度高，抗冲击和抗振性能最好，不易崩刃，但耐磨性较差	适于碳钢及合金钢，包括钢锻件、冲压件及铸件的表皮加工，以及不平整断面和间断切削时的粗车、粗刨、半精刨、粗铣、钻孔等
	YT14	使用强度高，抗冲击性能和抗振动性能好，但较 YT5 稍差，耐磨性及允许的切削速度较 YT5 高	适于碳钢及合金钢连续切削时的粗车，不平整断面和间断切削时的半精车、精车，连续面的粗铣、铸孔的扩钻等
	YT15	耐磨性优于 YT14，但抗冲击韧度较 YT14 差	适于碳钢及合金钢加工中，连续切削时的半精车、精车，间断切削时的小断面精车，旋风车螺纹，连续面的半精铣与精铣，孔的粗扩与精扩
	YT30	耐磨性及允许的切削速度较 YT15 高，但使用强度及冲击韧度较差，焊接及刃磨极易产生裂纹	适于碳钢及合金钢的精加工，小断面的精车，精镗、精扩等

续表

类型	牌号	性能特点	应用范围
添加钽（铌）类	YG6A	属细晶粒合金，耐磨性和使用强度与 YG6X 相似	适于硬铸铁、球磨铸铁、有色金属及其合金的半精加工；亦适于高锰钢、淬火钢及合金钢的半精加工和精加工
	YG8A	属中颗粒合金，其抗弯强度与 YG8 相同，而硬度和 YG6 相同，高温切削时热硬性较好	适于硬铸铁、球磨铸铁、白口铁及有色金属的粗加工；亦适于不锈钢粗加工和半精加工
	YW1	热硬性较好，能承受一定的冲击负荷，通用性较好	适于耐热钢、高锰钢、不锈钢等难加工钢材的精加工；亦适于一般钢材和普通铸铁及有色金属的半精加工
	YW2	耐磨性稍次于 YW1 合金，但使用强度较高，能受较大的冲击负荷	适于耐热钢、高锰钢、不锈钢及高级合金钢等难加工钢材的半精加工；也适于一般钢材和普通铸铁及有色金属的半精加工
碳化钛基类	YN05	耐磨性接近陶瓷，热硬性极好，高温抗氧化性优良，抗冲击和抗振动性能差	适于钢、铸钢和合金铸铁的高速精加工，及机床—工件—刀具系统刚性特别好的细长件的精加工
	YN10	耐磨性及热硬性较高，抗冲击和抗振动性能差，焊接及刃磨性能均较 YT30 好	适于碳钢、合金钢、工具钢及淬火钢的连续面精加工。对于较长件和表面粗糙度要求小的工件，加工效果尤佳

4. 刀具几何参数的选择

刀具的合理几何参数是指在保证加工质量的前提下，能够获得最高刀具寿命、切削效率以及较低生产成本的最佳刀具几何参数。刀具的几何参数包括刀具角度、切削刃形状、刃口形式和刀面形式等。选择刀具几何参数时，主要应考虑工件材料、刀具材料、刀具类型以及具体的加工条件，如加工机床类型、工艺系统刚性、切削用量等因素。刀具几何参数是一个有机的整体，各参数之间既相互依赖又相互制约，应综合分析和考虑各参数之间的联系，以便进行合理的选择。

（1）前角及前刀面的选择

1）前角的选择。刀具前角的大小决定着刀刃的锋利和坚固程度。增大前角可以减小切削变形，从而减小切削力和降低切削温度，提高刀具寿命；但前角过大又会使刀具楔角减小，降低刀头强度和散热能力，使得寿命下降。因此，前角应在一个合理的范围内。表 3-10 为硬质合金车刀合理前角和后角的参考值。

前角的选择原则是在刀具强度许可条件下，尽可能选用较大的前角。具体选择时还应考虑刀具材料、工件材料、加工形式等因素。刀具材料的强度、韧性较高时，可选择较大的前角，如高速钢刀具前角在同样条件下比硬质合金钢刀具的前角可大 5～10°；加工塑性材料时宜选用较大的前角以减少金属变形和摩擦，加工脆性材料应取小的前角；精加工时可取较大前角，粗加工取较小前角。

表 3-10　硬质合金车刀合理前角和后角的参考值

工件材料	合理前角/（°）		合理后角/（°）	
	粗车	精车	粗车	精车
低碳钢	20～25	25～30	8～10	10～12
中碳钢	10～15	15～20	5～7	6～8
合金钢	10～15	15～20	5～7	6～8
淬火钢	−15～−5		8～10	
不锈钢（奥氏体）	15～20	20～25	6～8	8～10
灰铸铁	10～15	5～10	4～6	6～8
铜及其合金	10～15	5～10	6～8	6～8
铝及其合金	30～35	35～40	8～10	10～12
钛合金（$\sigma_b \leqslant 1.77$GPa）	5～10		10～15	

2）前刀面的类型。图 3-29 为几种常见前刀面的类型。

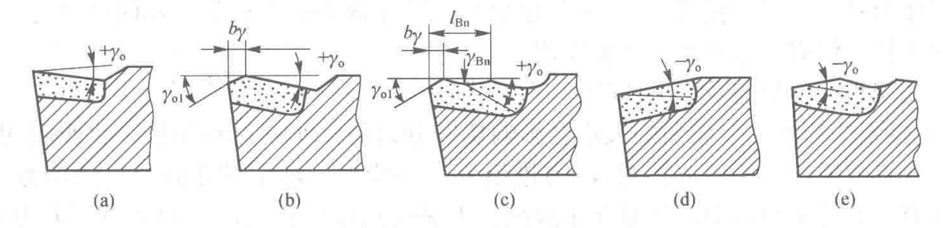


图 3-29　前刀面的类型

（a）正前角平面型；（b）正前角平面带倒棱型；（c）正前角曲面带倒棱型；（d）负前角单面型；（e）负前角双面型

图 3-29（a）所示为正前角平面型。刀具制造简单，能获得较锋利的刃口，但切削刃强度较低，传热能力较差。

图 3-29（b）所示为正前角平面带倒棱型。在主切削刃口磨出一条窄的负前角棱边，提高了切削刃口的强度，增加了散热能力，从而提高了刀具耐用度。

图 3-29（c）所示为正前角曲面带倒棱型。在正前角平面带倒棱型的基础上，磨出一定的曲面，可增大前角并起卷屑作用。

图 3-29（d）所示为负前角单面型。刀片可承受压应力，具有较高的切削刃强度，但负前角会增大切削力和功率消耗。

图 3-29（e）所示为负前角双面型。会增加刀片的重磨次数，适用于磨损同时发生在前、后刀面的场合。

（2）后角及后刀面的选择

1）后角的选择。刀具后角的功用是减小后刀面与过渡表面之间的摩擦。后角过大会使楔角变小，刀具散热困难；后角过小又会加剧刀具磨损，降低刀具寿命。硬质合金车刀合理前角和后角的参考值见表 3-10。

后角的选择原则是在不产生摩擦的条件下，适当选择较小的后角。具体选择时还应考虑切削厚度、工件材料、刀具形式、工艺系统刚性等因素。例如，切削厚度很小时宜选用较大

后角，以使刃口锋利；工件材料强度、硬度高时宜选用较小值，反之取较大的后角；粗加工以保证刀具强度为主，可选4～6°，精加工以加工表面质量为主，常取 8～12°；切断刀后角比外圆车刀大，一般取较大值；工艺系统刚性较差时，应适当减小后角。

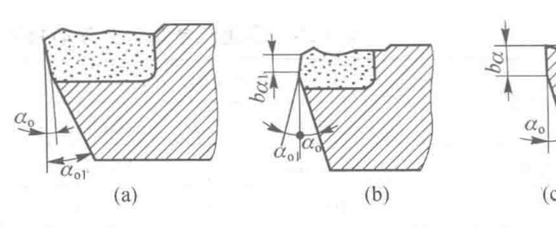


图 3-30　后刀面的类型

(a) 双重后角；(b) 消振棱；(c) 刃带

2）后刀面的类型。图 3-30 为几种常见后刀面的类型。

图 3-30（a）所示为双重后角。双重后角指在后刀面磨出两个后角（如图中的 α_o 和 α_{o1}），能保证刃口强度，减少刃磨工作量。

图 3-30（b）所示为消振棱。消振棱是指在后刀面磨出一条副后角的棱边（如图中的 b_{a1}），可增大阻尼，起消振作用。

图 3-30（c）所示为刃带。刃带是指在后刀面上磨出后角为零的小棱边（如图中的 b_a），对于定尺寸刀具（拉刀、铰刀等），为了控制外径尺寸常需磨出刃带，同时可避免重磨后尺寸精度的变化，但刃带也有增大摩擦作用。

（3）主偏角、副偏角及刀尖的选择

1）主偏角的选择。主偏角的大小会影响切削分力的大小和比例关系，也影响切削层的形状和工件表面质量。当背吃刀量 a_p 与进给量 f 一定时，随主偏角减小，切削宽度增加，单位长度刀刃上的负荷减小，且有利于散热，刀具耐用度将会提高。增加还使刀尖角增大，使刀尖强度增加。但主偏角越小，则径向切削分力越大，容易产生振动，会加大已加工表面粗糙度。

主偏角的选择原则是在工艺系统刚度允许的条件下，选择较小的主偏角。例如，工艺系统刚性好，工件材料硬，背吃刀量小时取小值（如 $\kappa_r=10\sim30°$）；工艺系统刚性差，如车细长轴时常取 $\kappa_r=90\sim93°$。加工台阶轴时取$\kappa_r=90°$，车外圆或倒角时可取 $\kappa_r=45°$。

2）副偏角的选择。副偏角主要影响已加工表面的残留面积高度。副偏角小，可减小已加工表面粗糙度值；但副偏角过小会使副后面与已加工表面间的摩擦、磨损加大，且易产生振动。

副偏角的选择主要考虑工艺系统刚性，在不产生振动的条件下，副偏角不宜过大，一般为 5°～15°。精加工取小值（6°～10°），粗加工取大值（10°～15°）。要求表面粗糙度值很低的加工面，可选 $\kappa_r'=0$ 且增加一段修光刃。

3）刀尖的类型及选择。刀尖主要影响残余面积的高度及已加工表面的粗糙度。图 3-31 为几种常见刃尖的类型。

图 3-31（a）所示为直线型倒角刀尖。一般 $\kappa_{r\varepsilon}=(1/2)\kappa_r$，$b_\varepsilon'=(1/5\sim1/4)a_p$，多用于粗车或强力车刀上。

图 3-31（b）所示为圆弧刃刀尖。刀尖圆弧半径 r_ε 增大，平均主偏角减小，表面粗糙度值减小，可提高刀具耐用度，但由于 F_p 增大，切削中会产生振动。

图 3-31（c）所示为平行刃，也称为修光刃。平行刃是指在副切削刃近刀尖处磨出一小段 $\kappa_r=0°$的平行刀刃。一般修光刃长度 $b_\varepsilon'=(1.2\sim1.5)f$。修光刃能降低表面粗糙度的值，

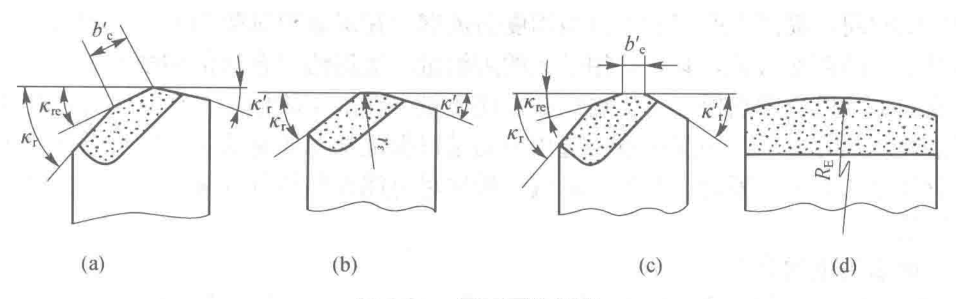


图 3-31　后刀面的类型

（a）直线刃；（b）圆弧刃；（c）平行刃；（d）大圆弧刃

但 b_ε 过大则易引起振动。

图 3-31（d）所示为大圆弧刀尖。其平均主偏角和副偏角均较小，刀具强度和耐用度均较高，切削的工件表面粗糙度值较小。

刀尖的选择主要考虑加工形式，粗加工时，应选择尽可能大的刀尖圆弧半径，以保证较高的刀刃强度；精加工时可用圆弧刃或修光刃，并与进给量配合，可获得较低的表面粗糙度值。

（4）刃倾角的选择

刃倾角的功用是控制切屑流向，影响刀头强度，断续切削时影响刀刃上受冲击点的位置。图 3-32 为刃倾角对切屑流向控制的示意图。

刃倾角的选择主要根据刀具强度、流屑方向和加工条件而定。粗加工一般钢料和铸铁时，$\lambda_s=0\sim-5°$，冲击负荷大时选 $\lambda_s=-5°\sim-15°$，精加工取 $\lambda_s=0°\sim5°$；精车或精刨时可取大刃倾角 $\lambda_s=45°\sim75°$；工艺系统刚性差时，尽量取正值。

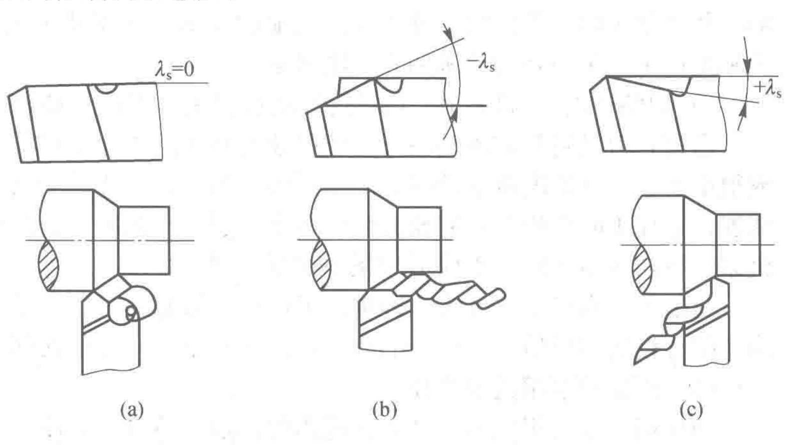


图 3-32　刃倾角对切屑流向的影响

5. 切削用量的选择

（1）合理切削用量及选用原则

合理的切削用量就是在保证加工质量的前提下，充分利用机床性能和发挥刀具的切削性能，获得较高生产率和较低加工成本的切削用量。因此，正确地选择切削用量，对于保证产品质量，提高劳动生产率，降低加工成本都具有重要意义。

在切削用量三要素中，背吃刀量 a_p 对刀具耐用度影响最小，切削速度 v_c 对刀具耐用度影响最大；提高背吃刀量对切削效率影响最大，提高切削速度对切削效率影响最小。因此，切削用量选用的原则可从切削加工的不同阶段来考虑。

在粗加工阶段以提高切削率和保证刀具寿命为主。粗加工阶段毛坯加工余量较大，加工精度和表面质量要求不高，因此切削用量的选用应以充分发挥机床和刀具的切削性能，减少

机动和辅助时间，提高生产率和刀具耐用度为依据，在保证刀具耐用度一定的条件下，首先采用尽可能大的背吃刀量，其次选用较大的进给量，最后给出合理的切削速度。

在精加工阶段应重点保证加工精度和表面质量。精加工阶段加工余量不大，加工精度和表面质量有规定的要求，切削用量的选用原则是以保证加工质量为主，同时兼顾必要的刀具使用寿命和生产效率。因此，精加工阶段应选用尽可能高的切削速度，较大的背吃刀量和较小的进给量。

(2) 切削用量的确定

1) 背吃刀量 a_p 的选用。背吃刀量主要是根据工件的加工余量确定的。

粗加工时，应尽可能一次走刀切除全部加工余量，以使走刀次数最少。在中等功率机床上，背吃刀量可达 8～10mm。当加工余量过大，工艺系统刚性较差，刀具强度不足或受到较大冲击载荷（如断续切削）时，也可分两次或多次走刀。采用两次走刀时，第一次走刀的背吃刀量应尽可能取大些，通常第一次取加工余量的 2/3～3/4。

半精车时，表面粗糙度值一般为 R_a3.2～6.3μm，取 a_p=1.0～3.0mm；精车时，表面粗糙度值一般为 R_a0.8～1.6μm，可取 a_p=0.05～0.8mm。半精铣时，取 a_p=0.5～1.0mm；精铣时，取 a_p=0.5mm。

2) 进给量 f 的选用。进给量选用的主要影响因素是切削力和工件的表面粗糙度。

粗加工时，对加工表面粗糙度要求不高，进给量主要受刀杆、刀片、工件及机床的强度和刚度所能承受的切削力的限制，因此合理的进给量应是它们所能承受的最大进给量。半精加工及精加工时，进给量主要受表面粗糙度和加工精度要求的限制，进给量一般选较小值。实际生产中，进给量通常采用查表法确定。

3) 切削速度 v_c 的选用。切削速度的选用主要考虑刀具和工件材料等因素。

通常，刀具材料的耐热性好，切削速度可选高些；工件材料的强度、硬度高，塑性很大或很小时，切削速度应取低些；加工带硬皮的工件，或进行断续切削时，应选取较低的切削速度；精加工时应避开积屑瘤的生成速度范围，一般取较高的切削速度；工艺系统刚性差或机床电机功率不足时，也应适当减小切削速度。

切削速度也可采用查表法确定。工厂里一般都是根据刀具生产厂商推荐的切削用量参数值，结合设备实际情况作适当的修正，最终确定出合适的切削用量。

(3) 提高切削用量的途径

切削用量的选用主要受到刀具耐用度、加工质量和机床功率的限制，所以，提高切削用量的主要途径有：

1) 采用切削性能更好的新型刀具材料。

2) 改进刀具结构，采用合理的刀具几何参数，提高刀具刃磨质量，提高刀具耐用度。

3) 在保证工件机械性能的前提下，改善工件材料加工性。

4) 采用性能优良的切削液，改善切削过程中的冷却和润滑条件，从而提高刀具耐用度和切削用量。

3.5.2 车刀

1. 车刀的种类和用途

车刀是金属切削加工中应用最广泛的一种刀具，可以安装在各种车床上，完成工件的外

圆、内孔、端面、螺纹以及成形表面的加工，也可用于切断和割槽等。按用途不同，车刀可以分为外圆车刀、内孔车刀、切断刀、螺纹车刀等，如图 3-33 所示。

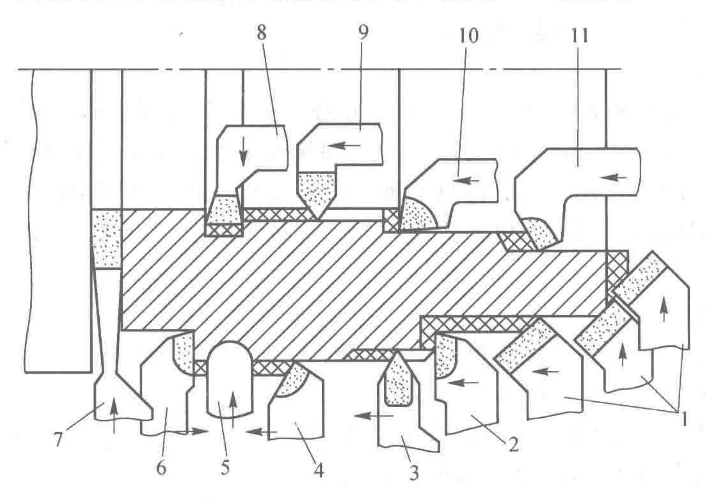


图 3-33　车刀的种类与用途

1—45°弯头车刀；2—90°外圆车刀；3—外螺纹车刀；4—70°外圆车刀；5—成形车刀；6—90°左偏外圆车刀；7—切断车刀；8—内孔槽刀；9—内螺纹车刀；10—盲孔镗刀；11—通孔镗刀

各种外圆车刀主要用来车削工件的外圆和端面，其中 90°车刀（偏刀）可以车削台阶，45°车刀（弯头车刀）可以用来倒角；内孔车刀又称镗刀，可以车削工件的内孔，可以是通孔，也可以是盲孔；切断刀用来切断工件；割槽刀用来在工件上切槽；螺纹车刀用来车削螺纹；成形车刀用来车削工件的圆弧面或成形面。

2. 车刀的结构类型

按结构的不同，车刀又可以分为整体式车刀、焊接式车刀、机夹式车刀和可转位式车刀等，如图 3-34 所示。

（1）整体式车刀

整体式车刀主要是高速钢车刀，俗称“白钢刀”，截面为正方形或矩形，使用时可根据不同用途进行修磨刀头的形状。整体式车刀耗用刀具材料较多，一般只用于制作切断刀和割槽刀。

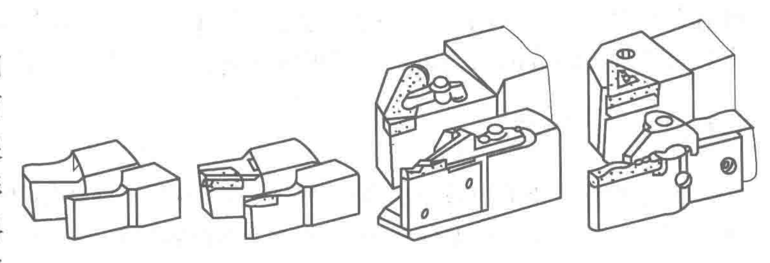


图 3-34　车刀的结构

（2）焊接式车刀

焊接式车刀是在碳钢（一般用 45 钢）刀杆上镶焊（钎焊）硬质合金刀片，并按选定的几何角度刃磨而成的车刀。

焊接式车刀结构简单，制造方便，可以根据具体的加工条件和要求进行刃磨，硬质合金材料利用充分，目前在车刀使用中占相当比重。焊接式车刀的硬质合金刀片型号已经标准化，可按需选用。刀杆的截面形状有正方形、矩形和圆形，可以根据机床的中心高和切削力的大小来选择其截面尺寸和长度。

但是，焊接式车刀的切削性能主要取决于工人刃磨的技术水平，与现代化生产不相适应；焊接工艺不够合理时易产生热应力，严重时会导致硬质合金出现裂纹；刀杆不能重复使用，当刀片用完以后，刀杆也随之报废。

(3) 机夹式车刀

机夹式车刀是指用机械的方法将硬质合金刀片夹固在刀杆上的车刀。与焊接式车刀相比，机夹式车刀的刀片不经高温焊接，可避免焊接引起的缺陷；刀片磨损后，可卸下重磨，刀杆可多次重复使用；刀杆也可进行热处理，提高硬质合金刀片支承面的硬度和强度，从而提高了刀具的使用寿命。但是，机夹式车刀的结构较为复杂，刀片重磨时仍有可能产生应力和裂纹。

(4) 可转位式车刀

可转位式车刀实质上就是使用可转位刀片的机夹式车刀。可转位式车刀一般由刀片、刀垫、刀杆和夹紧元件组成，如图 3-35 所示。

与普通机夹式车刀不同的是，可转位刀片为多边形，每一边都可作为切削刃，用钝后只需松开刀片夹紧元件，将刀片转位，新的切削刃即可投入工作，当全部切削刃都用钝后，换上新刀片又可继续使用了。可转位式车刀除具备普通机夹式车刀的优点外，其几何参数完全由刀片和刀槽保证，不受工人技术水平的影响，因此切削性能稳定，适合现代化生产的要求。

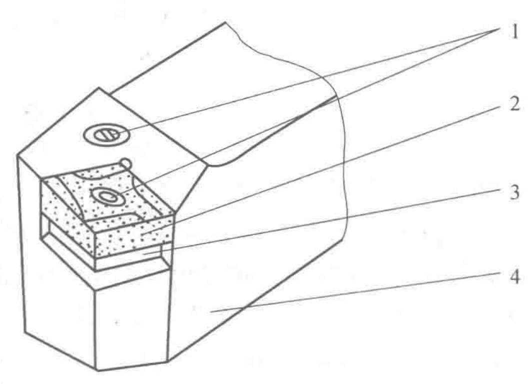


图 3-35 可转位式车刀的结构

1—夹紧元件；2—刀片；3—刀垫；4—刀杆

可转位刀片的型号也已经标准化，种类很多，可根据需要选用。刀片形状很多，常用的有三角形、正方形、五角形和圆形等，可根据加工工序的性质、工件的形状、刀具的寿命和刀片的利用率等因素合理选用。刀片的尺寸主要根据切削刃工作长度、刀片的强度、加工表面质量及工艺系统刚性等因素确定。刀具的实际角度由刀片和刀槽的角度组合确定。

3.5.3 砂轮

砂轮是磨削加工中最主要的磨削工具，使用时高速旋转，可对金属或非金属工件的外圆、内圆、平面和各种型面等进行粗磨、半精磨和精磨以及开槽和切断等加工。

1. 砂轮的特性

砂轮是由磨料和结合剂以适当的比例混合，经压坯、干燥、焙烧及车整而制成的多孔体。由于磨料、结合剂及制造工艺不同，砂轮的特性也有很大差别，因此对磨削的加工质量、生产率和经济性有着重要影响。砂轮的特性主要是由磨料、粒度、结合剂、硬度和组织等参数决定。

(1) 磨料

磨料是制造砂轮的主要原料，直接担负切削工作。因此，磨料应具有高的硬度、良好的耐热性和一定的韧性，在磨削过程中受力破碎后还要能形成锋利的几何形状。常用的磨料有氧化物系（刚玉类）、碳化物系和超硬磨料系 3 类，其名称、代号、性能、适用范围见表

3-11。

表 3-11　用磨料特性和适用范围

系别	名称	代号	主要成分	显微硬度 HV	颜色	特性	适用范围
氧化物系	棕刚玉	A	$w\ (Al_2O_3)>95\%$	2 200～2 288	棕褐色	硬度高，韧性好，价格便宜	碳钢、合金钢、可锻铸铁、硬青铜
	白钢玉	WA	$w\ (Al_2O_3)>99\%$	2 200～2 300	白色	硬度高于棕刚玉，韧性差	淬火钢、高速钢
碳化物系	黑碳化硅	C	$w\ (SiC)>95\%$	2 840～3 320	黑色带光泽	硬度高于刚玉，性脆而锋利，有良好的导热性和导电性	铸铁、黄铜、铝及非金属
	绿碳化硅	GC	$w\ (SiC)>99\%$	2 840～3 320	绿色	优良的导电性	硬质合金、光学玻璃
超硬磨料系	立方氮化硼	CBN	立方氮化硼	8 000～9 000	黑色	硬度仅次于金刚石，耐磨性和导电性好，发热量小	硬质合金、不锈钢、高合金钢等难加工材料
	人造金刚石	MBD	碳结晶体	10 000	乳白色	硬度极高，韧性很差，价格昂贵	硬质合金、宝石、陶瓷等高硬度材料

（2）粒度

粒度是指磨料颗粒尺寸的大小。粒度分为磨粒和微粉两类。颗粒尺寸大于 40μm 的磨料，称为磨粒。磨粒用筛选法分级，粒度号以磨粒通过的筛网上每英寸长度内的孔眼数来表示。如 60# 的磨粒表示其大小刚好能通过每英寸长度上孔眼数为 60 的筛网。粒度号越大，表示磨粒颗粒越小。颗粒尺寸小于 40μm 的磨料称为微粉。微粉用显微测量法分级，用 W 和后面代表微粉实际尺寸的数字表示粒度号。如 W20 表示微粉的实际尺寸为 20μm。

粒度对加工表面的粗糙度和磨削生产有较大影响。磨粒粗、气孔大时，砂轮不易堵塞和发热，磨削深度可较大。因此，粗磨时，加工余量大，要求粗糙度值较高，可选用较粗的磨粒；精磨时，磨削余量较小，要求粗糙度值较低，应选取较细磨粒。一般来说，磨粒越细，磨削表面质量越好。当工件材料硬度低、塑性大或磨削面积较大时，为了避免砂轮堵塞，也可采用较粗粒度的砂轮。常用磨料的粒度和适用范围见表 3-12。

（3）结合剂

砂轮中用以粘结磨料的物质称结合剂。结合剂的种类和性质决定了砂轮的硬度、强度、抗冲击性、耐热性及抗腐蚀性等性能。常用的结合剂种类、性能及用途见表 3-13。

（4）硬度

砂轮的硬度是指砂轮表面上的磨粒在磨削力作用下脱落的难易程度。它反映了磨粒与结合剂粘接的牢固强度。砂轮硬度高表示磨粒难以脱落，砂轮硬度低则表示砂轮的磨粒容易脱落，因此，砂轮的硬度与磨料的硬度是两个不同的概念。砂轮的硬度从低到高分为超软、

软、中软、中、中硬、硬、超硬 7 个等级，见表 3-14。

表 3-12　常用磨料的粒度和适用范围

类别	粒度	颗粒尺寸/μm	适用范围	类别	粒度	颗粒尺寸/μm	适用范围
磨粒	12#～36#	2 000～1 600	荒磨、去毛刺	微粉	W40～W28	40～28	珩磨、研磨
		500～400				28～20	
	46#～80#	400～315	粗磨、半精磨、精磨		W20～W14	20～14	研磨、超精加工
		200～160				14～10	
	100#～280#	160～125	精磨、珩磨		W10～W5	10～7	研磨、超精加工、镜面磨
		50～40				7～3.5	

表 3-13　常用结合剂的性能和适用范围

种类	代号	性能	适用范围
陶瓷	V	耐热性、耐腐蚀性好，气孔率大，易保持轮廓，但弹性差	应用广泛，适用于各种磨削加工
树脂	B	强度高、弹性大、耐冲击，但坚固性和耐热性差	适用于高速磨削，可用于开槽和切割薄片的砂轮
橡胶	R	强度和弹性更高，但耐热性差，磨粒易脱落	适用于开槽和切割的薄片砂轮，无心磨的砂轮和导轮，抛光砂轮等
金属	J	韧性和成形性好，强度大，导热性好，但自锐性差	适用于金刚石砂轮

表 3-14　砂轮的硬度等级

大级	超软			软			中软		中		中硬			硬		超硬
小级	超软			软 1	软 2	软 3	中软 1	中软 2	中 1	中 2	中硬 1	中硬 2	中硬 3	硬 1	硬 2	超硬
代号	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	Y

砂轮硬度选用的一般原则是：

1）工件材料较硬时，砂轮的工作磨粒磨损较快，为了能使磨钝的磨粒及时脱落，从而露出具有尖锐棱角的新磨粒（即自锐性），应选用软砂轮；工件材料较软时，砂轮的工作磨粒磨损很慢，为了使磨料不致过早脱落，则选用硬砂轮。

2）磨削有色金属等软材料时，由于砂轮易被堵塞，反而要选用软一下的砂轮，以使堵塞处的磨粒容易脱落，露出尖锐的新磨粒。

3）精磨时，为了保证磨削精度和表面粗糙度，应选用稍硬的砂轮。

4）工件与砂轮接触面积大或材料的导热性差时，容易产生烧伤和裂纹（如磨硬质合金等），应选用较软的砂轮。

（5）组织

砂轮的组织是指组成砂轮的磨粒、结合剂、气孔三者体积的比例关系。通常以磨粒所占砂轮体积的百分比来分级。组织号越小，磨粒所占比例越大，砂轮越紧密；反之，组织号越大，磨粒比例越小，砂轮越疏松，砂轮的组织代号和适用范围见表 3-15。

气孔可以容纳切屑，使得砂轮不易被堵塞，同时还能把切削液带入磨削区，降低磨削温

度。一般粗磨时宜选用较疏松的砂轮，精磨时宜选用较紧密的砂轮。生产中最常用的是中等组织的砂轮。

表 3-15　砂轮的组织代号和适用范围

类别	紧密				中等				疏松				大气孔		
组织代号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
磨粒率/（%）	62	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40	38	36	34
适用范围	重负荷、成形、精密磨削，间断及自由磨削，加工硬脆材料等				外圆，内圆、无心磨削，淬火钢工件，刀具刃磨等				粗磨，韧性大、硬度低的工件，薄壁或细长工件，砂轮与工件接触面积大或平面磨削等				有色金属及塑料等非金属，热敏感性大的合金等		

2. 砂轮的形状、尺寸及其选择

为了适应不同类型的磨床磨削各种形状和尺寸工件的需要，砂轮制成各种形状和尺寸。常用砂轮的形状、代号和主要用途见表 3-16。

砂轮各特性参数以代号的形式表示，其顺序是：形状、尺寸、磨料、粒度、硬度、组织、结合剂、最高线速度。例如砂轮 1－300×30×75－WA60L5V－35m/s，其含义是：外径 300mm，厚度 30mm，孔径 75mm，白刚玉磨料，粒度 60，硬度 L，5 号组织，陶瓷结合剂，允许的最高线速度为 35m/s 的平形砂轮。

选用砂轮时，其外径应尽可能选得大些，以提高砂轮的圆周速度，有利于提高磨削加工生产率和降低表面粗糙度。此外，在机床刚度及功率许可的条件下，选用宽度较大的砂轮，同样能达到提高生产率和降低粗糙度的目的。但是在磨削热敏性较高的材料时，为避免工件表面烧伤和产生裂纹，砂轮宽度应适当减小。

表 3-16　常用砂轮形状及用途

砂轮名称	代号	断面形状	尺寸标记	主要用途
平形砂轮	1	D T H	$1-d\times T\times H$	磨外圆、内圆、平面，无心磨，工具刃磨
筒形砂轮	2	D W $W\leqslant0.17D$ T	$2-d\times T\times W$	端磨平面
双斜边砂轮	4	D T U H	$4-d\times T/U\times H$	磨削齿轮和螺纹

续表

砂轮名称	代号	断面形状	尺寸标记	主要用途
杯形砂轮	6		$6-d\times T\times H-W$，E	端磨平面，刃磨刀具后刀面
双面凹一号砂轮	7		$7-d\times T\times H-P$，F，G	磨外圆，无心磨，刃磨刀具后刀面
碗形砂轮	11		$11-d/J\times T\times H-W$，E，K	磨导轨，刃磨刀具后刀面
碟形一号砂轮	12a		$12a-d/J\times T/U\times H-W$，$E$，$K$	刃磨刀具前刀面
薄片砂轮	41		$41-d\times T\times H$	切断和磨槽

3.6 轴类零件的装夹

3.6.1 工件的装夹

1. 装夹的概念

为保证工件在加工前相对于机床和刀具占有正确的加工位置，并且在加工过程中始终保持加工位置的稳定可靠，这一工艺过程称为装夹。用于装夹工件的工艺装备就是机床夹具。在成批加工时，工件一般都通过夹具进行装夹的，因此机床夹具是机械加工工艺系统的一个重要组成部分。

工件的装夹包括定位和夹紧两个过程。

定位是使工件在机床或夹具中占有正确位置的过程。工件的定位就是保证一批工件中的每个工件在同一工序中都能在机床或夹具中占有正确的加工位置。

夹紧是工件定位后通过一定的装置产生夹紧力把工件固定，使工件始终保持其正确位置的过程。通过夹紧可以使工件在加工过程中克服切削力、离心力、惯性力、重力等力的作用，保持其位置不发生变化，以保证加工的正常进行。

2. 装夹的方式

工件在机床上的装夹方式，取决于生产批量、加工精度、工件大小及复杂程度等，主要的装夹形式有以下 3 种：

（1）直接找正装夹

对于形状简单的零件，可以利用划针或用百分表等工具，按工件的某个（或某些）表面进行找正，并将工件准确地装夹在机床上。

直接找正装夹的方式效率较低，通常适用于单件小批生产、加工表面单一或加工精度要求不高的场合。

（2）划线找正装夹

对于形状复杂的零件，可以按图纸要求在工件表面上先划出位置线、加工线或找正线，装夹工件时，再按照划线找正工件的位置进行定位和夹紧。

划线找正装夹不需要专用设备，通用性好，但效率较低，精度也不高，通常用于单件小批生产中铸件的粗加工工序，也可用于大型铸件的精加工。

（3）使用夹具装夹

夹具上有根据工件的具体加工要求设计的定位和夹紧装置，使用夹具装夹，可实现工件迅速而正确的定位和夹紧。

夹具装夹方式无须划线和找正，定位精度好，装夹效率高，可以减轻工人的劳动强度并降低对工人技术水平的要求，广泛应用于各种生产类型。

3.6.2 机床夹具概述

机床夹具是在机床上对工件进行可靠地定位和夹紧，使工件在加工过程中始终保持其正确加工位置的工艺装备。

1. 机床夹具的分类

（1）按夹具的应用范围分类

1）通用夹具。通用夹具指结构已经标准化，而且有较大适用范围的夹具。例如，车床上的三爪卡盘和四爪单动卡盘，铣床上的平口钳、分度头和回转工作台等。这类夹具一般由专业工厂生产，常作为机床附件提供给用户。其特点是适应范围广，生产效率低，适用于单件、小批量生产。

2）专用夹具。专用夹具是指针对某一工件的某一工序而专门设计的夹具。其特点是结构紧凑，操作迅速、方便、省力，可以保证较高的加工精度和生产效率，但设计制造周期较长、制造费用也较高。因其用途专一，只适用于产品固定且批量较大的生产中。

3）通用可调夹具和成组夹具。通用可调夹具的部分元件可以更换，部分装置可以调整，以适应不同零件的加工。成组夹具是用于成组加工相似零件的夹具，通过调整或更换夹具上的个别元件，即可加工同组内的不同零件。通用可调夹具与成组夹具均适于在多品种、中小批生产等场合，通用可调夹具的适用范围更广一些。

4）组合夹具。组合夹具是由一套预先制造的标准元件和部件组装而成的夹具。组合夹

具一般由专业厂家制造，其结构灵活多变，通用性强，制造周期短，元件能重复使用，适用于新产品试制和单件小批生产。

5）随行夹具。随行夹具是一种在自动线上使用的移动式夹具。生产中，夹具连同被加工工件一起沿着自动线依次从一个工位移到下一个工位，进行不同工序的加工，直到退出自动线时才将工件从夹具上卸下。

（2）按使用的机床分类

不同类型的机床具有自身的工作特点和结构形式，其适用的夹具结构也各不相同。按所使用的机床不同，夹具可分为车床夹具、铣床夹具、钻床夹具、镗床夹具、磨床夹具、齿轮机床夹具以及其他机床夹具等。

（3）按夹紧动力源分类

根据夹具所采用的夹紧动力源不同，夹具又可分为手动夹具、气动夹具、液压夹具、气液联动夹具、电磁夹具、真空夹具等。

2. 机床夹具的组成

机床夹具一般由定位元件、夹紧装置、对刀和导向元件、连接元件、夹具体等部分组成，下面通过一个钻床夹具的实例来说明。图 3-36（a）所示为某轴套工件，要求加工 ϕ6H7 孔并保证轴向尺寸 ϕ37.5±0.02。图 3-36（b）所示为轴套的钻床夹具，工件以内孔及端面为定位基准，通过夹具上的定位销 6 及其端面即可确定工件在夹具中的正确位置。拧紧螺母 5，通过开口垫圈 4 可将工件夹紧，然后由装在钻模板 3 上的快换钻套 1 导引钻头进行钻孔。

（1）定位元件

定位元件是指用来确定工件正确位置的元件。它与工件的定位基准直接接触或配合，从而保证加工时工件相对于刀具和机床之间的准确的位置关系。如图 3-36（b）中的定位销 6。

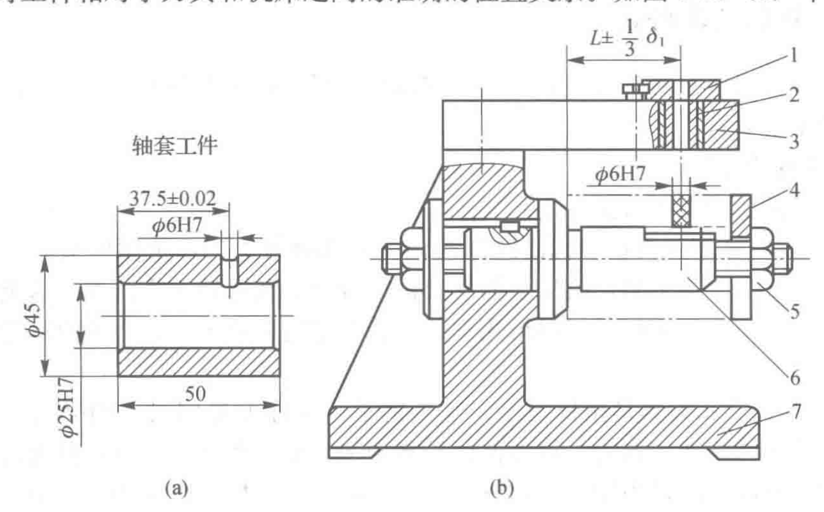


图 3-36 钻床夹具

1—钻套；2—导向套；3—钻模板；4—开口垫圈；5—螺母；6—定位销；7—夹具体

（2）夹紧装置

夹紧装置是指用于夹紧工件，使其在加工时仍能保持正确既定位置的装置。如图 3-36（b）中的螺母 5 和开口垫圈 4。

（3）对刀和导向元件

对刀元件和导向元件是指用于确定或引导刀具相对于工件具有正确位置关系的元件。用于确定刀具在加工前正确位置的元件，称为对刀元件。用于确定刀具位置并导引刀具进行加工的元件，称为导向元件。如图 3-36（b）中的钻套 1。

（4）连接元件

连接元件是指用于确定夹具在机床上具有正确位置并与之连接的元件，如定位键、定位销及紧固螺栓等。

（5）夹具体

夹具体是用来连接或固定夹具上各元件及装置，使其成为一个整体的基础件，夹具通过夹具体与机床连接。如图 3-36（b）中的夹具体 7。

（6）其他装置

有些夹具根据工件的加工要求，还设有分度机构、靠模装置、安全防护装置等其他元件及装置。

以上这些组成部分中，定位元件、夹紧装置和夹具体是夹具的基本组成部分，是任何夹具都必须具备的，其他元件或装置可根据需要设置。

3. 机床夹具的作用

（1）保证工件的加工精度

用机床夹具装夹工件，工件与刀具、机床之间的尺寸精度和位置精度由夹具确定，不受工人技术水平的影响，从而能保证加工精度。

（2）提高生产效率

机床夹具能快速地将工件定位及夹紧，工件不需要划线找正，可显著地减少辅助工时；可以实现多件、多工位装夹，提高生产效率；广泛采用气动、液压等机动夹紧机构，使辅助时间进一步减少。

（3）扩大机床的工艺范围

加工机床附以不同类型的夹具，可以扩大其原有的工艺范围。例如，在车床或摇臂钻床上使用镗模，可以代替镗床进行镗孔。

（4）减轻劳动强度

使用夹具可使工件装卸更加方便、安全、省力。例如，采用机械、气动、液动夹紧装置，可以减轻操作者的劳动强度，保证安全生产。

3.6.3　工件在夹具中的定位与夹紧

1. 定位原理

（1）六点定位原理

在相互垂直的空间坐标系中，一个自由的物体可以有六种可能的运动。其中三个是沿坐标轴的平行移动，用 $\vec{x}$，$\vec{y}$，$\vec{z}$ 表示；另外三个是绕坐标轴的旋转运动，用 $\widehat{x}$，$\widehat{y}$，$\widehat{z}$ 表示，如图 3-37（a）所示。这六种运动的可能性被称为物体的六个自由度。

用合理分布的六个支承点限制工件的六个自由度，以保证工件在加工时相对于机床和刀具占有正确的位置，这种工件的定位方法被称为六点定位原理。如图 3-37（b）所示，在 xOy 坐标平面内的 1，2，3 三个支承点限制了 $\vec{z}$，$\widehat{x}$，$\widehat{y}$ 三个自由度；在 yOz 坐标平面内的

4，5 两个支承点限制 $\vec{x}$，$\widehat{z}$ 两个自由度；在 xOz 坐标平面内 6 的一个支承点限制了 $\vec{y}$ 一个自由度。

（2）定位状态

按照限制工件的自由度数目的不同，可将工件的定位状态分为完全定位、不完全定位、欠定位和过定位。

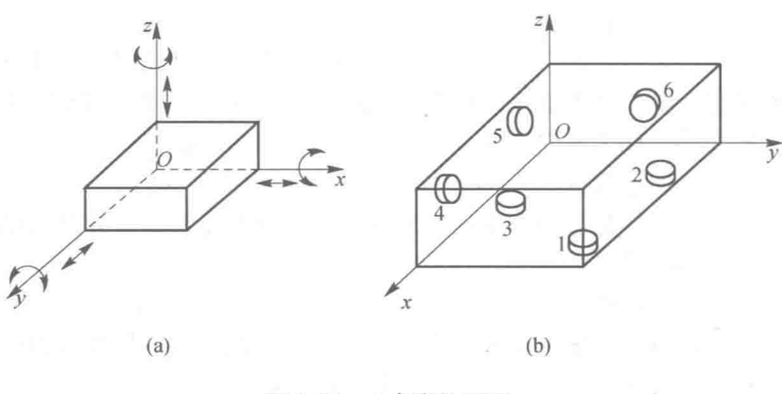


图 3-37　六点定位原理

1）完全定位。工件的六个自由度都被限制，使工件在夹具中处于完全确定的位置，称为完全定位。如图 3-38（a）所示，在工件上加工不通槽时，除槽宽由刀具直径保证外，为保证尺寸 A，B，C，需要限制 $\vec{x}$，$\vec{y}$，$\vec{z}$ 的移动和 $\widehat{x}$，$\widehat{y}$，$\widehat{z}$ 的转动等六个自由度。

2）不完全定位。在实际生产中，工件的六个自由度没有被完全限制，但仍然能保证有关工序的定位要求，称为不完全定位。如图 3-38（b）所示，在工件上加工通槽，不需要保证 C 尺寸，所以也不必限制 $\vec{y}$ 的自由度，只需要限制其他五个自由度就可以了。再如图 3-38（c）所示，在工件上加工平面，不需要保证尺寸 B 和 C，所以也不必限制 $\vec{x}$，$\widehat{z}$ 的自由度，只需要限制其他三个自由度就可以了。

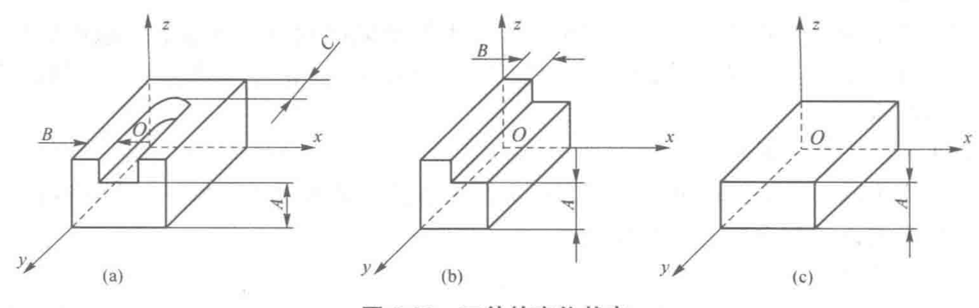


图 3-38　工件的定位状态

3）欠定位。工件加工时，如果定位支承点少于应限制的自由度数，则工件处于定位不足的状态，称为欠定位。如图 3-38（a）所示，如果没有支承点来限制 $\vec{y}$ 的自由度就为欠定位。

4）过定位。工件加工时，如果定位支承点多于应限制的自由度数，即工件的一个或几个自由度被几个定位支承点重复限制，称为过定位。如图 3-38（a）所示，如果用两个支承点来限制 $\vec{y}$ 的自由度就为过定位。

过定位一般情况下不允许，但有时为了增加工件刚度或稳定性，也可进行过定位；欠定位是绝对不允许的。

2. 常见的定位方式及定位元件

（1）工件以平面定位

1）固定支承。使用时高度不变的支承为固定支承，有支承钉和支承板两种形式。

支承钉多用于以平面作定位基准时的定位。图 3-39（a）所示为平顶支承钉，适用于已

加工表面的定位；图 3-39（b）所示为圆顶支承钉，可减小定位误差，适用于毛坯面定位，但支撑钉容易磨损和压伤工件基准面；图 3-39（c）所示为网纹顶支撑钉，常用于有较大摩擦力的侧面定位，但清除切屑不便；图 3-39（d）所示为带衬套支撑钉，便于拆卸和更换，适用于批量大、磨损快的场合。一个支承钉只限制一个自由度。支撑钉与夹具体的配合可用 H7/r6 或 H7/n6。

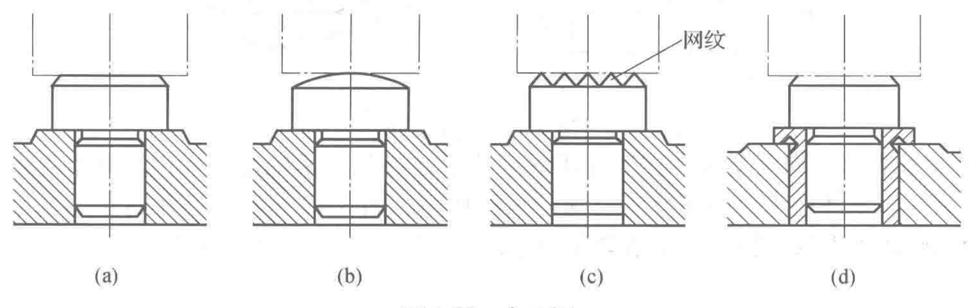


图 3-39　支承钉

支承板具有较大的支承面积，工件定位稳定，一般用作精基准面较大时的定位元件。图 3-40（a）所示为平板式支承板，结构简单、紧凑，但不易清除落入沉头螺钉孔内的切屑，多用于侧面和顶面定位；图 3-40（b）所示为斜槽式支承板，固定螺钉安装在斜槽内，便于清屑，适用于底面定位。

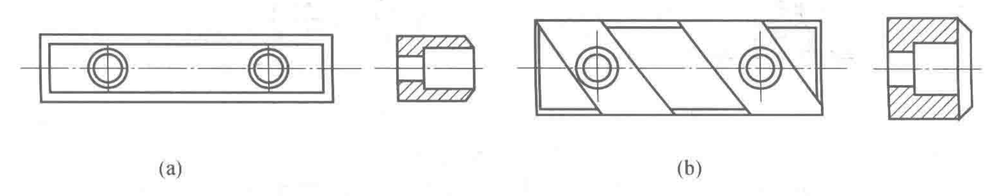


图 3-40　支承板

2）可调支承。支承高度可以在一定范围内调整的支承称为可调支承。图 3-41 所示为几种常见的可调支承，主要用于表面不平整或毛坯尺寸变化较大的工件，也可作为成组夹具的调整元件使用。

3）自位支承。自位支承又称浮动支承，在工件的定位过程中，支承点的位置可以自动调整以适应工件表面的变化。图 3-42 所示为常见的几种自位支承结构。自位支承起定位作用，只限制一个自由度，常用于毛坯表面、断面表面、阶梯表面以及有角度误差的平面定位。

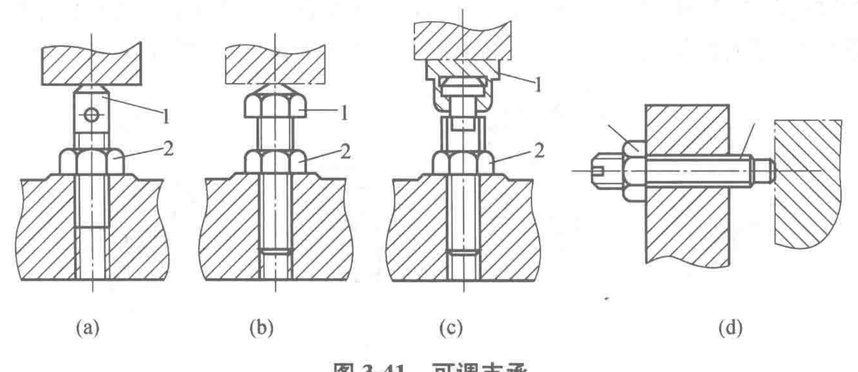


图 3-41　可调支承

1—可调支承钉；2—螺母

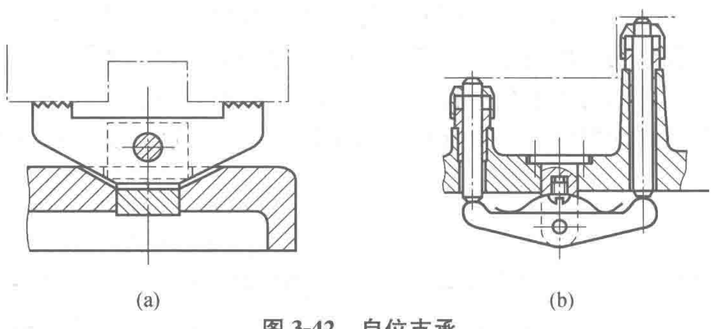


图 3-42　自位支承

4）辅助支承。辅助支承是在工件实现定位后才参与支承的定位元件，其本身不起定位作用，只提高工件加工时的刚度或起辅助定位作用。图 3-43 所示为两种常见的辅助支承结构，为不破坏工件的定位，其支承动作的操作应在每次工件定位、夹紧后进行。

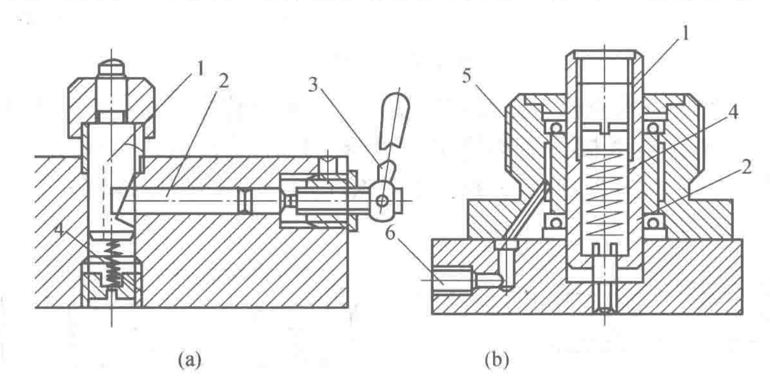


图 3-43　辅助支承

1—支承滑柱；2—锁紧装置；3—手柄；4—弹簧；5—安装螺母；6—液压回路

(2) 工件以内孔定位

工件以圆柱孔定位一般属于定位基准为孔的轴线，常用以下定位元件。

1）圆柱定位销。如图 3-44 所示为几种国家标准规定的圆柱定位销。其工作部分一般依据加工和装夹要求，按 g6，g7，f6 或 f7 制造。图 3-44（a）（b）（c）所示的定位销与夹具体的连接采用的是过盈配合。图 3-44（d）带衬套的可换式定位销，大批量生产时，工件装卸频繁，定位销易磨损，采用此结构便于更换，衬套外径与夹具体配合采用 H7/n6，而内径与定位销的配合采用 H7/h6 或 H7/g6；所有定位销的定位端头部均做成 15°的长倒角，以便于工件套入。短圆柱销限制零件 2 个自由度，长圆柱销限制零件 4 个自由度。

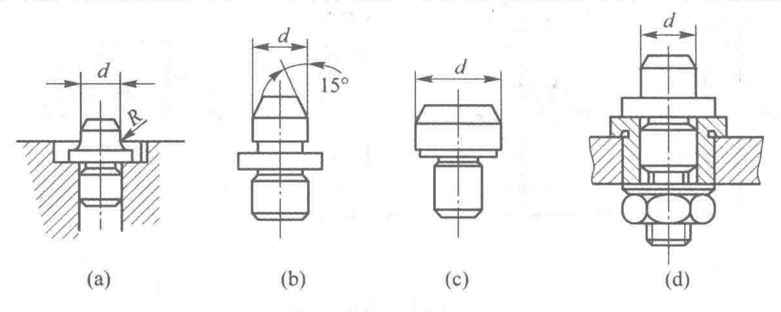


图 3-44　圆柱定位销

(a) $d<10$；(b) $10\leqslant d\leqslant 18$；(c) $d>18$；(d) $d>10$

2）圆锥销。在加工套筒类工件时，也常用锥形定位销，如图 3-45 所示。图 3-45（a）所示圆锥销用于粗基准，图 3-45（b）所示圆锥销用于精基准。圆锥销可限制工件 3 个移动自由度。

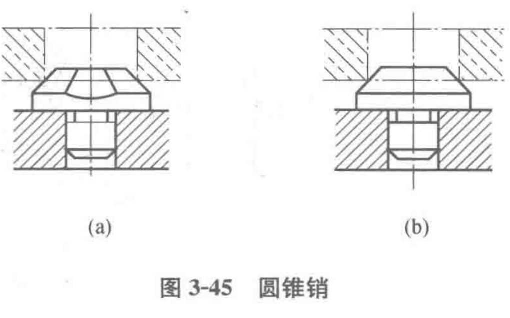


图 3-45　圆锥销

3）定位心轴。用于以内孔表面为定位基准的工件，如套筒、盘类等。定位心轴主要有圆柱心轴和圆锥心轴两种形式。

圆柱心轴常用的定位方法有间隙配合心轴和过盈配合心轴。

如图 3-46（a）所示为间隙配合心轴，定位部直径按 h6，g6，f7 制造。此类心轴装卸工件方便，但是定位精度不高。

如图 3-46（b）所示为过盈配合心轴，它由导向部分 3、工作部分 2 和安装部分 1 构成。当工件孔的长度与直径之比 $L/d>1$ 时，为装卸工件方便，工作部分可有一定的锥度。此类心轴定位精度高，结构简单，但装卸不便，易损伤工件的定位孔，多用于定心精度要求较高的场合。

短圆柱心轴限制零件 2 个自由度，长圆柱心轴限制零件 4 个自由度。

如图 3-46（c）所示为花键心轴，用于加工以花键孔定位的工件。当工件孔的长度与直径之比 $L/d>1$ 时，工作部分可稍带锥度。

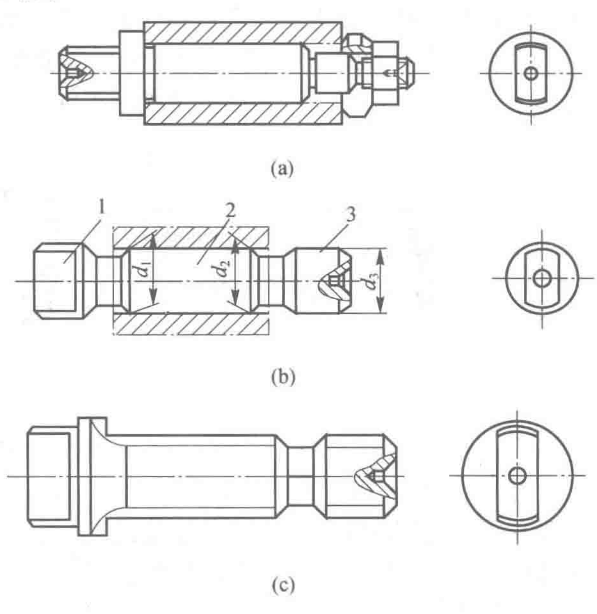


图 3-46　圆柱心轴

1—安装部分；2—工作部分；3—导向部分

如图 3-47 所示为圆锥心轴。其锥度一般为1/1 500～1/2 000，使用时将工件轻轻压入，依靠锥面使工件对中和涨紧，此种心轴用于磨削或精车。圆锥心轴可限制除绕其轴线转动的自由度以外的其他 5 个自由度。

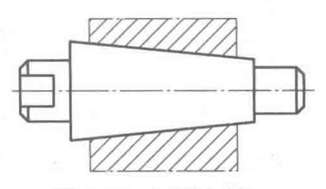


图 3-47　圆锥心轴

（3）工件以外圆定位

1）V 形块。V 形块的结构如图 3-48 所示。V 形块用销子及螺钉紧固在夹具体上，工件外圆中心对中于两斜面的对称轴线上，故对中性好，安装方便。

两斜面的夹角 α 一般选用 60°，90°和 120°。如图 3-48（a）所示短 V 形块用于精基准；图 3-48（b）所示长 V 形块用于粗基准；图 3-48（c）所示长 V 形块用于精基准；图 3-48（d）为用于工件较长且定位基面直径较大的场合。V 形块定位基准面用镶淬硬垫片或镶硬质合金，便于其磨损后更换。根据 V 形块与工件的接触母线长度，其分为短 V 形块和长 V 形块。短 V 形块限制零件的 2 个自由度，长 V 形块限制零件的 4 个自由度。

2）定位套。定位套定位是定心定位，其定位的情况与圆柱孔定位相似。如图 3-49 所示

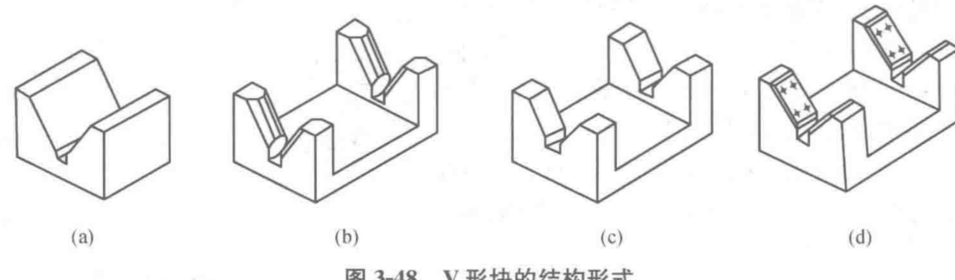


图 3-48 V 形块的结构形式

为工件以外圆柱表面为主要定位基面的场合。如图 3-49（a）所示为短定位套孔，限制工件的 2 个自由度；如图 3-49（b）所示为长定位套孔，限制工件的 4 个自由度。如图 3-49（c）所示为锥孔的定位方式，其圆锥销限制工件的三个移动自由度。

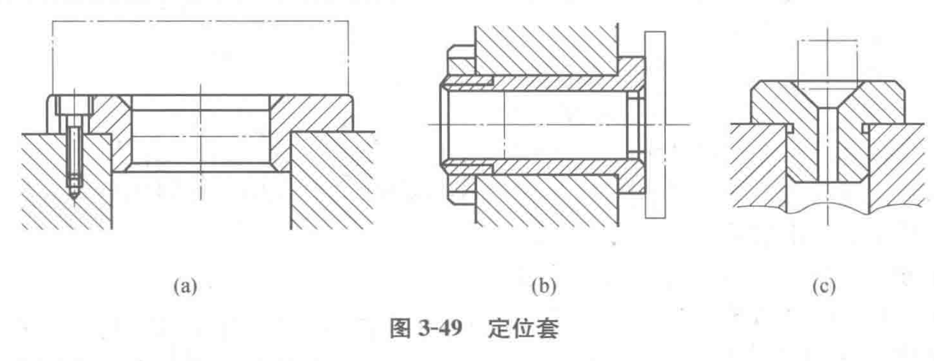


图 3-49 定位套

3）半圆套。当工件尺寸较大，用圆柱孔定位不方便时，可将圆柱孔设计成两半，下半孔用作定位，上半孔用于压紧工件，如图 3-50 所示。

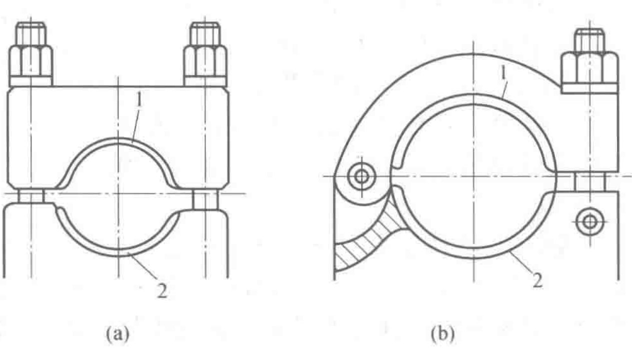


图 3-50 半圆套

1—上半圆套；2—下半圆套

短半圆孔定位限制工件的 2 个自由度；长半圆孔定位限制工件的 4 个自由度。

（4）工件以一面两孔定位时的定位元件

在实际生产中，为满足加工要求，有时采用几个定位面相组合的方式进行定位。如两顶尖孔、一端面一孔、一端面一外圆、一面两孔等，与之对应的定位元件也是组合式的。其中工件以一面两孔的定位方式最为常见。在加工箱体工件时，往往采用一平面及与该平面垂直的两孔作为定位基准。

如采用如图 3-51 所示一面两孔的定位方式，两短圆柱销同时限制了 $\vec{x}$ 自由度，会造成过定位。为解决这个问题，宜采用如图 3-52（a）所示的形式，即定位元件为一平面、一短圆柱销及一短的削边销，如图 3-52（b）与（c）所示为削边销的截面形状。其中一平面限制了 $\hat{x}$，$\hat{y}$，$\vec{z}$；一短圆柱销限制了 $\vec{x}$，$\vec{y}$；一短的削边销限制了 $\overset{\frown}{z}$。

销尺寸设计的方法与步骤如下：

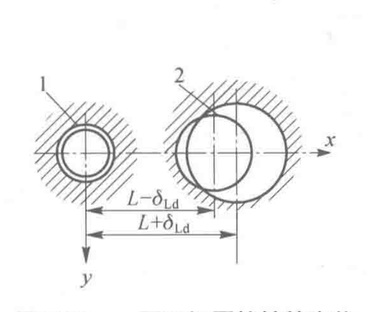


图 3-51　一面两短圆柱销的定位

1，2—孔

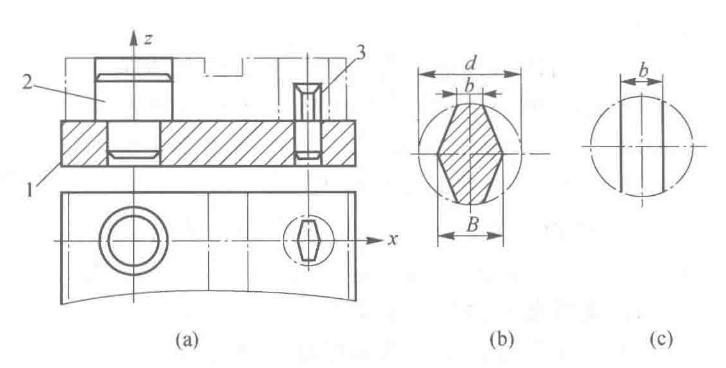


图 3-52　一面一短圆柱销一短削边销的定位

1—平面；2—短圆柱销；3—短削边销

1）两销中心距离的确定。两销中心距的尺寸等于工件两孔中心距的基本尺寸；其偏差常取工件两孔中心距偏差的 1/5～1/3，为便于制造，当孔距公差大时，取小值；反之，取大值。

2）短圆柱销直径尺寸 d_1 的确定。取 $d_{1min}=D_{1max}$，其直径公差按 g6，f7 配合形式选取，并进行尺寸圆整处理。

3）削边销宽度 b 与 B 值的确定。削边销的结构尺寸已标准化，设计时应按表 3-17 选取。

表 3-17　削边销的结构尺寸　　mm

配合孔 D_2	>3～6	>6～8	>8～20	>20～24	>24～30	>30～40	>40～50
b	2	3	4	5	5	6	8
B	$D_2-0.5$	D_2-1	D_2-2	D_2-3	D_2-4	D_2-5	D_2-5

4）计算削边销直径尺寸 d_2。先按式（3.12）计算出削边销与工件孔配合的最小间隙，然后按式（3.13）计算削边销直径尺寸 d_2，并按 g6 或 f7 选取偏差，最后圆整处理。

$$X_{2min}=\frac{b(T_{LD}+T_{ld})}{D_{2min}} \tag{3.12}$$

$$d_{2max}=D_{2min}-X_{2min} \tag{3.13}$$

式中　X_{2min}——削边销与孔配合的最小间隙（mm）；

b——削边销宽度（mm）；

T_{LD}，T_{ld}——工件上两定位孔中心距公差与夹具上两定位销中心距公差（mm）；

D_{2min}——工件上削边销最小直径尺寸（mm）；

d_{2max}——削边销最大直径尺寸（mm）。

3. 夹紧装置的组成

工件在机械加工过程中，为了保证其定位时确定的正确位置，使其在加工过程中不会因受切削力、惯性力或离心力等作用而发生振动或位移，从而保证加工质量和生产安全，应该采用一定的机构将工件夹紧，这个机构就是夹具的夹紧装置。夹紧装置一般由力源装置、传力机构和夹紧元件等部分组成，如图 3-53 所示。

1）力源装置。产生夹紧原始作用力的装置。机动夹紧装置通常有气动、液动、电动等

几种形式。

2）传力机构。是把力源装置产生的力传递到夹紧元件的中间机构。其作用主要是改变作用力的大小和方向；具有一定的自锁功能，当力源消失后，工件仍被牢固夹紧。

3）夹紧元件。是夹紧装置的最终执行元件，与工件直接接触并最终夹紧工件。

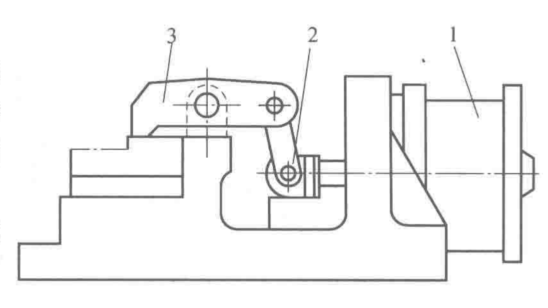


图 3-53　夹紧装置组成

1—力源装置；2—传力机构；3—夹紧元件

4. 夹紧装置的基本要求

1）在夹紧过程中，应能保持工件定位时的正确位置。

2）夹紧力的大小适当。夹紧机构应能保证在加工过程中工件不产生松动或振动，又能保证工件不产生明显的变形或损伤。

3）夹紧装置应操作方便、快捷、省力、安全可靠。

4）工艺性好，结构简单，便于制造、调整和维修。

5. 确定夹紧力的原则

夹紧力一般包括大小、方向和作用点三个要素，确定夹紧力的原则就是合理确定这三个要素。确定时，应根据工件的结构特点、加工要求，同时结合工件加工中的受力情况及定位元件的结构和布置形式等综合考虑。

（1）夹紧力方向的确定

1）夹紧力的作用方向应有利于工件的定位。一般要求主要夹紧力垂直指向主要定位面。主要定位面的面积较大，限制的自由度较多，夹紧力的方向垂直于该面容易保持装夹稳固，从而有利于保证加工精度。如图 3-54 所示，在直角支座零件上镗孔，要求孔与端面 B 垂直，此时主要定位面应为 B 面，夹紧力应为 F_{j2} 垂直于 B 面。如夹紧力应为 F_{j1} 垂直于 A 面，不仅装夹稳定性差，而且因工件的 B 端面与 A 面的垂直度误差，使被镗孔与 B 面的垂直度要求难于保证。

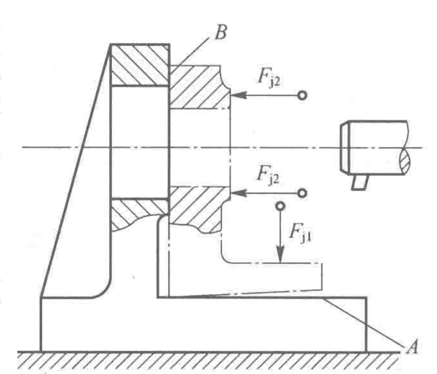


图 3-54　夹紧力作用方向的选择

2）为了减少所需夹紧力，夹紧力的方向应尽量与切削力、工件重力方向一致。如图 3-55（a）所示，夹紧力 F_j 与切削力的方向相反，这样夹紧力至少要大于切削力；对于如图 3-55（b）所示，夹紧力 F_j 与切削力的方向相同，此时，所需夹紧力较小，因为切削力可以由夹具的固定支承承受。

3）夹紧力的方向应尽量与工件刚度最大的方向相一致，为的是减少工件变形。例如薄壁套筒零件的轴向刚度比径向刚度大，如采用图 3-56（a）所示的用三爪卡盘夹紧的方式，将会产生很大的变形；如采用图 3-56（b）所示的夹紧方式，用螺母轴向夹紧工件，就不易产生变形。

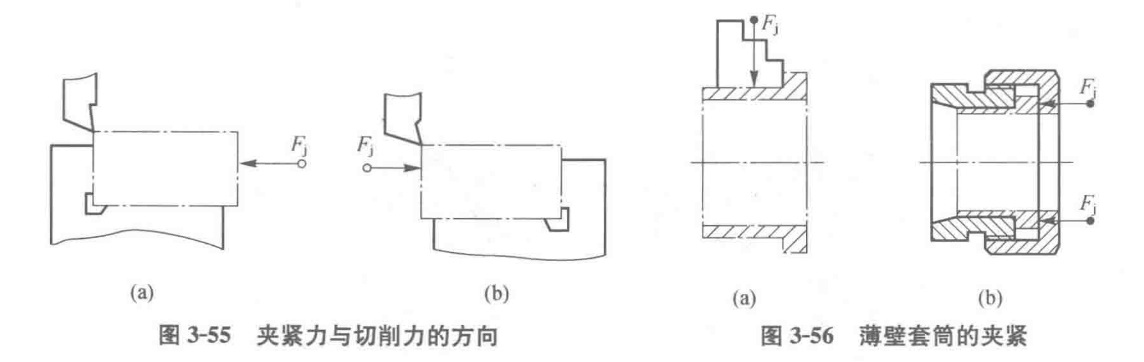


图 3-55　夹紧力与切削力的方向　　图 3-56　薄壁套筒的夹紧

（2）夹紧力作用点的确定

夹紧力作用点的确定是在夹紧力作用方向确定的情况下，确定夹紧元件与工件接触点的位置和接触点的数目。

1）夹紧力的作用点应落在定位元件的支承范围内或正对支承欲元件，以保证工件已取得的定位不变。如图 3-57（b）所示，夹紧力不在支承元件的支承范围内，工件就会产生翻转的力矩，定位就会被破坏，所以，应把作用点移至支承的范围内，如图 3-57（a）所示把夹紧力 F_j 移至定位销轴线上。

图 3-57　夹紧力作用点的位置

2）为减小工件因受夹紧力而产生的变形，夹紧力的作用点应落在工件刚度好的部位。如图 3-58（a）（b）所示。

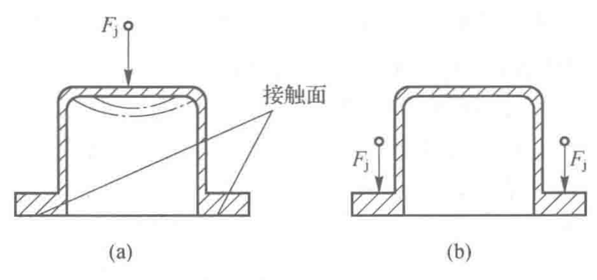


图 3-58　夹紧力的作用点的选择

3）夹紧力作用点应尽量靠近加工表面，以减少切削力对工件造成的翻转力矩。必要时用在工件刚度差的部位增加辅助支承并施以附加夹紧力，以避免振动与变形。

3.6.4　轴类零件的常用装夹方法

1. 用三爪卡盘装夹

三爪自定心卡盘是车床上最常用的自定心夹具，其结构如图 3-59 所示。当用卡盘扳手转动小锥齿轮时，与之啮合的大锥齿轮也随之转动，在大锥齿轮背面平面螺纹的作用下，三个卡爪同时向心收缩或退出，以夹紧或松开工件。三爪自定心卡盘有正、反卡爪两种形式，正卡爪用于装夹外圆直径较小和内孔直径较大的工件，反卡爪用于装夹外圆直径较大的工件。

三爪自定心卡盘可用于多种机床，能自定中心夹紧或撑紧圆形、三角形、六边形等各种形状的外表面或内表面的工件。其特点是对中性好，夹持工件时一般不需要找正，装夹速度较快，自动定心精度可达到 0.05～0.15mm。但由于三爪门定心卡盘夹紧力不大，所以一般

只适宜于重量较轻的工件。

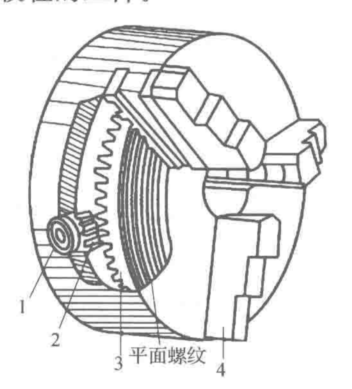


图 3-59　三爪自定心卡盘

1—方孔；2—小圆锥齿轮；3—大圆锥齿轮；4—卡爪

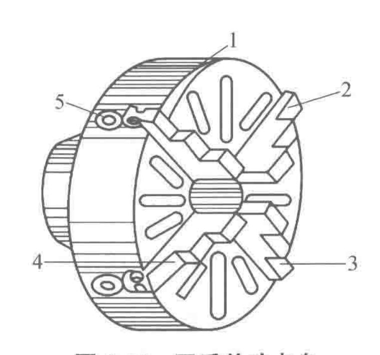


图 3-60　四爪单动卡盘

1，2，3，4—卡爪；5—丝杆

2. 用四爪卡盘装夹

四爪单动卡盘也是车床上常用的夹具之一，其结构如图 3-60 所示。四爪单动卡盘有四个各自独立运动的卡爪，卡爪的背面都有半圆弧形螺纹与丝杆啮合，转动卡盘扳手，即可通过丝杆带动卡爪单独移动，将工件装夹在卡盘中。

通过四个卡爪的相互配合，四爪单动卡盘可夹持不同大小和形状的工件，夹紧力较大，装夹精度较高，适用于装夹形状不规则或大型的工件。但在装夹时必须进行找正，以使工件的旋转中心与车床主轴的旋转中心重合，因此装夹不如三爪自定心卡盘方便。

3. 用两顶尖装夹

对于尺寸较长或加工工序较多的轴类零件，如长轴、长丝杆等，为了保证每次装夹时的装夹精度，可采用两顶尖的方法进行装夹，如图 3-61 所示。

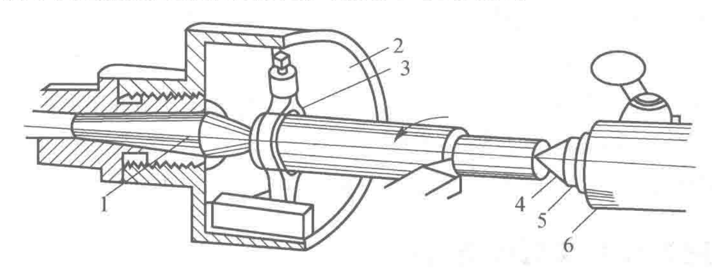


图 3-61　用两顶尖及鸡心夹头装夹工件

1—顶尖；2—拨盘；3—鸡心夹头；4—尾顶尖；5—尾座套筒；6—尾座

采用两顶尖装夹时，工件两端必须先钻出中心孔，再把轴安装在前后两个顶尖上。此时，工件便以两端的中心孔定位，并通过拨盘和鸡心夹头来带动旋转。

工件两端的顶尖起定心、承受工件重量及切削力的作用，有前顶尖和后顶尖两种。前顶尖可用三爪自定心卡盘装夹，或直接插在主轴锥孔内跟主轴一起旋转，前顶尖随同工件一起转动，无相对运动，不发生摩擦。后顶尖插在车床尾座套筒内，有固定顶尖（见图 3-62）和活顶尖（见图 3-63）两种。固定顶尖刚性好，定心准确，但普通顶尖（见图 3-62（a））在车削时会与工件中心孔产生滑动摩擦而产生大量的热量，容易磨损或烧坏，目前多使用硬质合

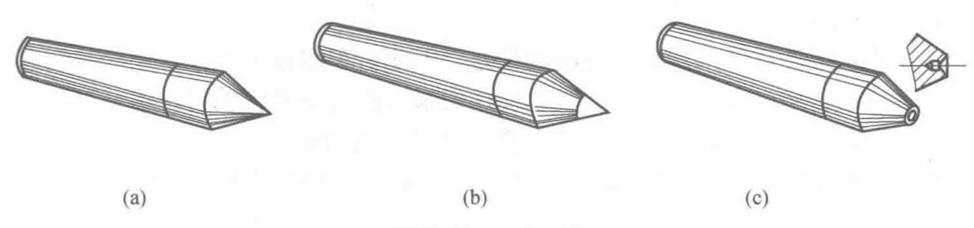


图 3-62　固定顶尖

(a) 普通顶尖；(b) 硬质合金顶尖；(c) 反顶尖

金顶尖，如图 3-62（b）所示。活顶尖内部装有滚动轴承，如图 3-62（c）所示，顶尖与工件一起转动，能在高转速下正常工作，但活顶尖的刚性会降低。支承细小工件时，可用反顶尖。

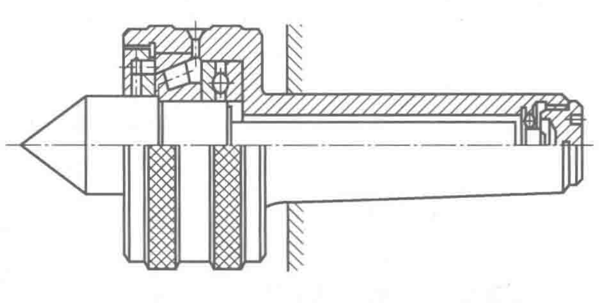


图 3-63　活顶尖

当车削细长的轴类工件（$L/D>10$）时，为增加工件刚度，防止因切削力的作用而弯曲变形，可使用中心架或跟刀架等辅助支承，如图 3-64 和图 3-65 所示。

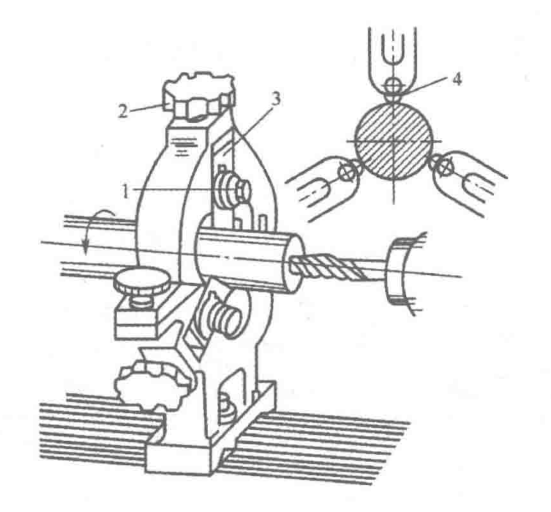


图 3-64　中心架

1—固定螺母；2—调节螺钉；
3—支承爪；4—支承辊

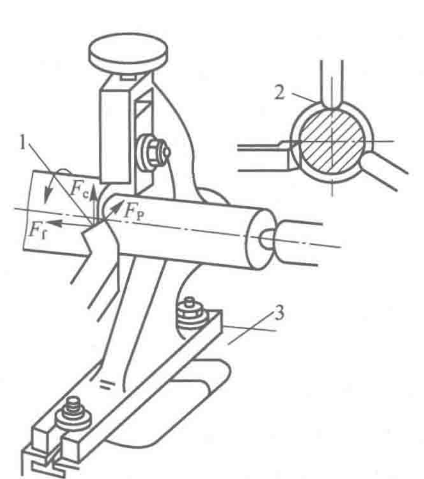


图 3-65　跟刀架

1—刀具对工件的作用力；
2—硬质合金支承块；3—床鞍

中心架固定于床身导轨上，不随刀架移动，主要用于细长阶梯轴、轴端面孔和中心孔的加工。支承工件前，先在工件上车一小段光滑表面，然后调整中心架的 3 个支承爪与其接触，再分段进行车削。加工长轴的端面或轴端的孔时，可用卡盘夹持轴的一端，用中心架支承轴的另一端，图 3-64 所示是利用中心架钻轴端面孔的情况。

跟刀架固定在床鞍上，随床鞍一起移动，如图 3-65 所示。使用跟刀架前需先在工件上靠后顶尖的一端车出一小段外圆，再根据它来调节跟刀架的支承爪，车出工件的全长。跟刀架多用于加工细长的光轴和长丝杆等工件。

4. 用一夹一顶装夹

用两顶尖装夹工件虽然精度高，但刚性较差。因此，车削较重工件时要用一端夹住，另一端用后顶尖顶住的装夹方法。为了防止工件在切削力作用下产生轴向位移，必须在卡盘内安装限位支承，如图 3-66（a）所示；或直接利用工件的台阶限位，如图 3-66（b）所示。这种装夹方法能承受较大的轴向切削力，刚性大大提高，因而应用较为广泛。

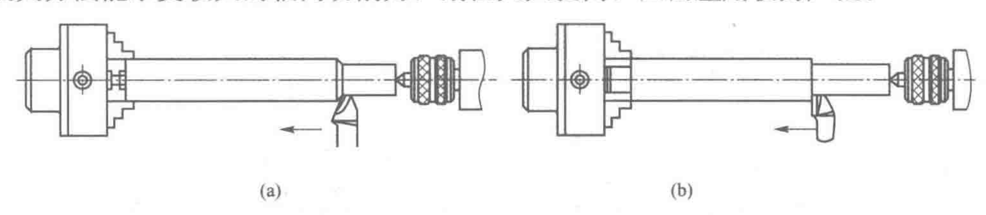


图 3-66 用一夹一顶装夹工件

（a）用限位支承；（b）用工件台阶限位

5. 用夹具装夹

（1）心轴式车床夹具

此类夹具一般利用车床的主轴锥孔或顶尖安装在机床的主轴上。按照工件的定位面的具体情况，常见的结构有圆柱心轴、圆锥心轴、花键心轴、弹簧心轴和顶尖式心轴等。如图 3-67 所示为常见的间隙配合的圆柱心轴。其工作部分与工件内孔一般按 H7/h6，H7/g6，H7/f7 的配合形式. 所以装卸工件较方便，但定心精度不高。夹紧螺母处采用开口垫片为的是快速装卸工件。

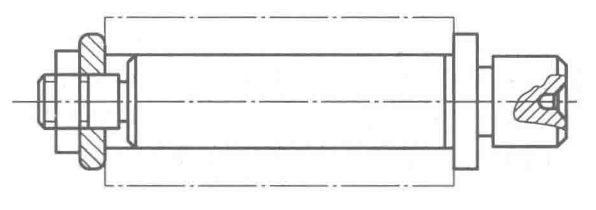


图 3-67 心轴式车床夹具

（2）角铁式车床夹具

角铁式车床夹具一般用于比较复杂结构的零件的装夹。如图 3-68 所示是一镗车内孔的角铁式车床夹具。夹具中采用一面两销的定位方法，并用螺钉、压板压紧工件两侧的凸台。这种类型的夹具结构多为不均称，为防止高速转动时产生较大的离心惯性力，故设置了一定质量的平衡块 9。夹具上还设置有轴向定程基面 3，其与圆柱定位销保持确定的轴向距离，利用它来控制刀具的轴向行程。

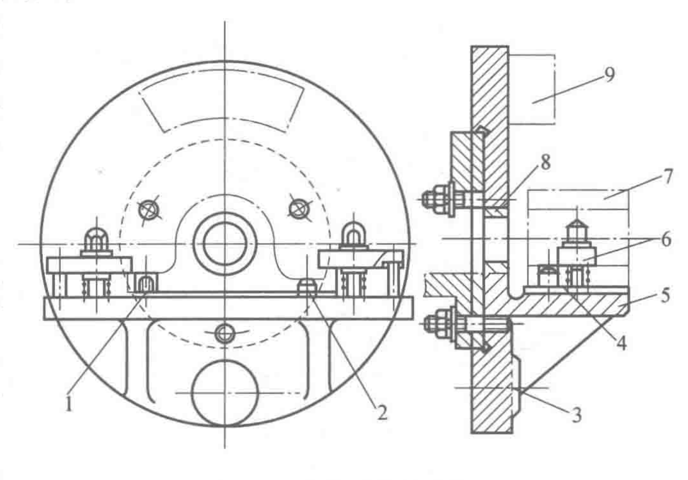


图 3-68 角铁式车床夹具

3.7 轴类零件的测量

轴类零件的尺寸常用游标卡尺或千分尺进行测量。

1. 游标卡尺

游标卡尺是工业上常用的测量长度的仪器，它由主尺和附在主尺上能滑动的游标两部分构成，可以用来测量工件的长度、外径、内径以及深度等。游标卡尺按测量精度可分为0.1mm，0.05mm，0.02mm三种。按测量尺寸范围有0～125mm，0～150mm，0～200mm，0～300mm等多种规格。使用时可根据零件的精度要求和尺寸大小进行选择。

(1) 游标卡尺的结构

游标卡尺的结构及使用方法如图3-69所示。该游标卡尺是读数精度为0.02mm，测量尺寸范围为0～150mm的两用游标卡尺。游标卡尺由主尺和游标（副尺）两部分组成。游标上部有一紧固螺钉，可将游标固定在尺身上的任意位置。主尺和游标上有两副活动量爪，下量爪通常用来测量长度和外径，上量爪通常用来测量内径。深度尺与游标尺连在一起，可以测槽和筒的深度。

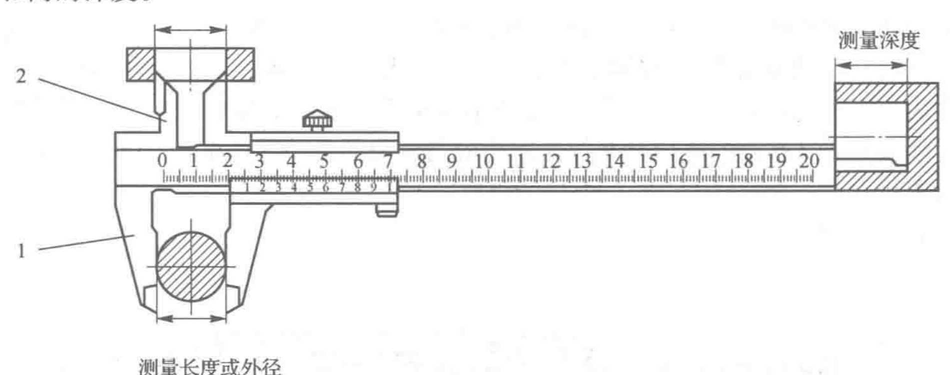


图3-69　游标卡尺的结构

1—下量爪；2—上量爪；3—紧固螺钉；4—游标；5—尺身；6—深度尺

(2) 游标卡尺的读数原理

游标卡尺的主尺上每小格为1mm，当两卡爪贴合，即主尺与游标的零线重合时，游标上的50个格正好等于主尺上的49mm。因此，游标上每格长度为49÷50=0.98mm，主尺与游标每格相差0.02mm，如图3-70（a）所示。

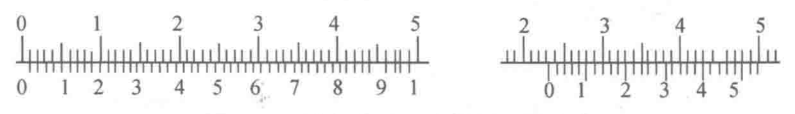


图3-70　游标卡尺的读数原理及方法

(3) 游标卡尺的读数方法

游标卡尺的读数方法如下：

1) 读整数。根据游标零线以左的主尺上的最近刻度读出整毫米数。

2) 读小数。根据游标零线以右与主尺上的刻度对准的刻线格数乘上0.02读出小数。

3) 合并读数。将上述整数和小数两部分合并相加，即得到测量的总尺寸。

如图3-70（b）中，游标零线以左的主尺上的最近刻度为23mm；零线以右与主尺上的刻度对准的刻线格数为12，12×0.02=0.24mm；所以，被测尺寸为23+0.24=23.24mm。

2. 千分尺

千分尺又称分厘卡，其测量精度一般为0.01mm，也是机械加工中应用最广泛的精密量

具之一。千分尺的品种与规格较多，按其用途和结构可分为外径千分尺、内径千分尺、内测千分尺、深度千分尺、壁厚千分尺、杠杆千分尺、螺纹千分尺、公法线千分尺等。外径千分尺的规格如按测量范围划分，在500mm以内，每25mm为一挡，如0～25mm，25～50mm等规格，在500mm以上至1 000mm，每100mm为一挡，如500～600mm，600～700mm等规格。

（1）外径千分尺的结构

外径千分尺的组成部件及其结构如图3-71所示。图中所示为测量范围为0～25mm的外径千分尺。

（2）外径千分尺的读数原理

外径千分尺右端的固定套管6在轴线方向刻有一条中线（基准线），上、下两排刻线互相错开0.5mm，形成主尺；微分筒7左端圆周上刻有50条等分刻线，形成副尺，如图3-72所示。微分筒与测微螺杆3连接在一起，由于测微螺杆的螺距为0.5mm，因此当微分筒转动一周时，就会带动测量螺杆沿轴向移动0.5mm；当微分筒转过一格时，测微螺杆的轴向移动距离为0.5 mm÷50＝0.01 mm，所以该千分尺的测量精度为0.01 mm。当百分尺的测量螺杆与固定砧座2接触时，微分套筒的边缘应与轴向刻度的零线重合。同时，圆周上的零线也应与中线对准。

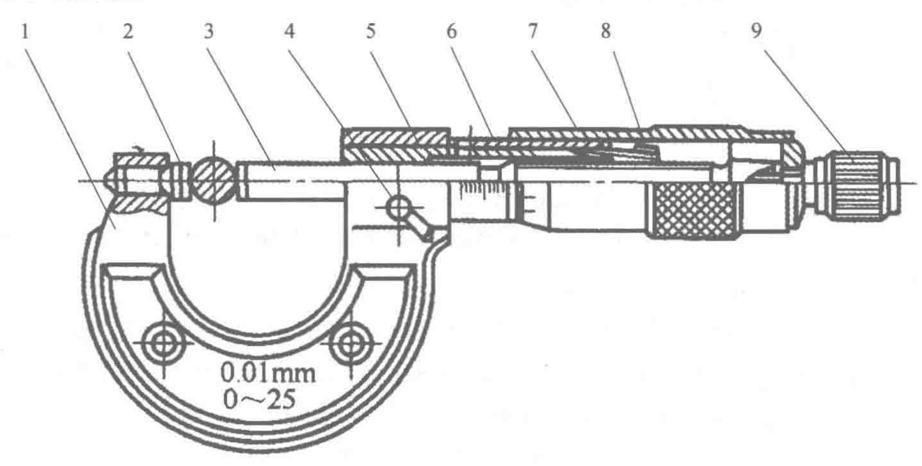


图3-71　外径千分尺的结构

1—尺架；2—砧座；3—测微螺杆；4—锁紧装置；5—螺纹轴套；6—固定套管；7—微分筒；8—调节螺母；9—棘轮

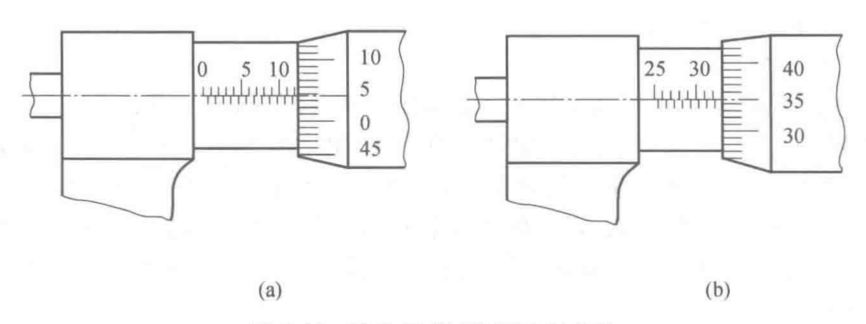


图3-72　千分尺的读数原理及方法

(a) 0～25mm百分尺读数；(b) 25～50mm百分尺读数

(3) 外径千分尺的读数方法

外径千分尺的读数方法如下：

1) 读整数。根据微分筒锥面的端面以左固定套管上露出的刻线数值读出毫米数。注意：标出数字一测的刻线表示整毫米数，未标数字的一测即为 0.5 毫米数。

2) 读小数。根据与固定套管轴向刻度中线重合的微分套筒周向刻度数值乘上 0.01 读出小数。

3) 合并读数。将上述整数和小数两部分合并相加，即得到测量的总尺寸。

如图 3-72 (a) 中，微分筒锥面的端面以左固定套管上露出的刻线（标出数字一测）为 12 mm；与固定套管轴向刻度中线重合的刻度数值为 5，5×0.01＝0.05mm；所以，被测尺寸为 12＋0.05＝12.05mm。

如图 3-72 (b) 中，微分筒锥面的端面以左固定套管上露出的刻线（未标数字一测）为 32.5 mm；与固定套管轴向刻度中线重合的刻度数值为 35，35×0.01＝0.35mm；所以，被测尺寸为 32.5＋0.35＝32.85mm。

3.8　项目实施

1. 任务分析

3.1 中的任务是编制传动轴的机械加工工艺过程卡和工序卡。该传动轴从结构上看是一个典型的阶梯轴，工件材料为 45 钢，调质处理为 217～255HBS，各尺寸精度、表面粗糙度等技术要求均在正常加工要求范围内，中小批量生产。因此，学生在已经掌握的机械制图、公差与配合、工程材料、机械设计基础等相关专业基础知识，和车工、钳工等实践技能的基础上，按照项目 2 中机械加工工艺规程的设计方法与步骤，综合运用项目 3 所学的关于轴类零件的毛坯选择、外圆表面加工方法、加工设备和刀具、装夹和测量方法等知识和技能，就可以完成传动轴的机械加工工艺过程卡和工序卡的编制任务。

2. 工作计划

(1) 明确任务

学生以 3～5 人为一项目小组的形式实施任务，以利于小组成员之间开展协作与交流，培养学生的团队精神。根据任务要求，共同分析完成任务所需掌握的知识、技能和相关技术资料，明确小组成员的任务分工。分工时应做到责任明晰，任务量均衡饱满。

(2) 收集资料

小组成员根据任务分工，收集与轴类零件工艺规程编制相关的工艺文件和技术资料。

(3) 实施任务

围绕所研究的任务查阅资料，收集数据，共同探讨传动轴机械加工工艺过程卡和工序卡的编制具体方法与步骤，制定出详细的任务实施方案。项目组成员根据各自的任务分工，按照方案中制定的内容和程序展开工作。

3. 实施过程

(1) 分析阶梯轴的结构和技术要求

该轴为普通的实心阶梯轴，轴类零件一般只有一个主要视图，主要标注相应的尺寸和技

术要求，而其他要素如退刀槽、键槽等尺寸和技术要求标注在相应的剖面图上。

轴颈和装传动零件的配合轴颈表面，一般是轴类零件的重要表面，其尺寸精度、形状精度（圆度、圆柱度等）、位置精度（同轴度、与端面的垂直度等）及表面粗糙度要求均较高，是轴类零件机械加工时应着重保障的要素。

如图 3-1 所示的传动轴，轴颈 M 和 N 处是装轴承的，各项精度要求均较高，其尺寸为 ϕ35js6（±0.008），且是其他表面的基准，因此是主要表面。配合轴颈 Q 和 P 处是安装传动零件的，与基准轴颈的径向圆跳动公差为 0.02（实际上是与 M，N 的同轴度），公差等级为 IT6，轴肩 H，G 和 I 端面为轴向定位面，其要求较高，与基准轴颈的圆跳动公差为 0.02（实际上是与 M，N 轴线的垂直度），也是较重要的表面，同时还有键槽、螺纹等结构要素。

（2）明确毛坯状况

一般阶梯轴类零件材料常选用 45 钢；对于中等精度而转速较高的轴可用 40Cr；对于高速、重载荷等条件下工作的轴可选用 20Cr，20CrMnTi 等低碳合金钢进行渗碳淬火，或用 38CrMoALA 氮化钢进行氮化处理。阶梯轴类零件的毛坯最常用的是圆棒料和锻件。

（3）拟定工艺路线

1）确定加工方案。轴类在进行外圆加工时，会因切除大量金属后引起残余应力重新分布而变形。应将粗精加工分开，先粗加工，再进行半精加工和精加工，主要表面精加工放在最后进行。传动轴大多是回转面，主要是采用车削和外圆磨削。由于该轴的 Q，M，N 段公差等级较高，表面粗糙度值较小，应采用磨削加工。其他外圆面采用粗车、半精车、精车加工的加工方案。

2）划分加工阶段。该轴加工划分为三个加工阶段，即粗车（粗车外圆、钻中心孔）、半精车（半精车各处外圆、台肩和修研中心孔等），粗精磨 Q，M，P，N 段外圆。各加工阶段大致以热处理为界。

3）选择定位基准。轴类零件各表面的设计基准一般是轴的中心线，其加工的定位基准，最常用的是两中心孔。采用两中心孔作为定位基准不但能在一次装夹中加工出多处外圆和端面，而且可保证各外圆轴线的同轴度以及端面与轴线的垂直度要求，符合基准统一的原则。

在粗加工外圆和加工长轴类零件时，为了提高工件刚度，常采用“一夹一顶”的方式，此时是以外圆和中心孔同作为定位基面。

4）热处理工序安排。该轴需进行调质处理。它应放在粗加工后，半精加工前进行。如果采用锻件毛坯，必须首先安排退火或正火处理。该轴毛坯为热轧钢，可不必进行正火处理。

5）加工工序安排。应遵循加工顺序安排的一般原则，例如先粗后精、先主后次等。另外还应注意外圆表面加工顺序应为，先加工大直径外圆，然后再加工小直径外圆，以免一开始就降低了工件的刚度。

轴上的键槽等表面的加工应在外圆精车或粗磨之后、外圆精磨之前。这样既可保证键槽的加工质量，也可保证精加工表面的精度。

轴上的螺纹一般有较高的精度，其加工应安排在工件局部淬火之前进行，避免因淬火后产生的变形而影响螺纹的精度。

该轴的加工工艺路线为下料→粗车→热处理→钳→半精车→钳→铣→钳→磨→检。

（4）确定工序尺寸

毛坯下料尺寸：$\phi 65 \times 260$。

粗车时，各外圆及各段尺寸按图纸加工尺寸均留余量 2mm；半精车时，螺纹大径车到 $\phi 24_{-0.2}^{-0.1}$，$\phi 44$ 及 $\phi 62$ 台阶车到图纸规定尺寸，其余台阶均留 0.5mm 余量。

铣加工时，止动垫圈槽加工到图纸规定尺寸，键槽铣到比图纸尺寸多 0.25mm，作为磨销的余量。

精加工时，螺纹加工到图纸规定尺寸 M24×1.5－6g，各外圆车到图纸规定尺寸。

(5) 选择设备工装

外圆加工设备：普通车床 CA6140。

磨削加工设备：万能外圆磨床 M1432A。

铣削加工设备：铣床 X52。

(6) 填写机械加工工艺过程卡片

传动轴的机械加工工艺过程卡见表 3-18。

表 3-18　传动轴机械加工工艺过程卡

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td rowspan="2">机械加工工艺过程卡片</td><td>产品型号</td><td></td><td>零件图号</td><td></td><td colspan="2">共 1 页</td></tr>
<tr><td>产品名称</td><td></td><td>零件名称</td><td>传动轴</td><td colspan="2">第 1 页</td></tr>
<tr><td>材料牌号</td><td>45</td><td>毛坯种类</td><td>棒料</td><td>毛坯外形尺寸</td><td></td><td>每毛坯可制件数</td><td></td><td>每件台数</td><td></td><td>备注</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">序号</td><td rowspan="2">工序名称</td><td rowspan="2">工序内容</td><td rowspan="2">车间</td><td rowspan="2">工段</td><td rowspan="2">设备</td><td rowspan="2">工艺装备</td><td colspan="2">工时</td></tr>
<tr><td>准终</td><td>单件</td></tr>
<tr><td>10</td><td>下料</td><td>φ65×260</td><td>锻造</td><td>下料</td><td>锯床</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>20</td><td>车</td><td>1. 三爪卡盘夹持工件，车端面见平，钻中心孔，用尾架顶尖顶住，粗车 P，N 及螺纹段三个台阶，直径、长度均留余量 2mm
2. 调头，三爪卡盘夹持工件另一端，车端面保证总长 259，钻中心孔，用尾架顶尖顶住，粗车另外四个台阶，直径、长度均留余量 2mm</td><td>机加</td><td>车</td><td>CA6140</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>30</td><td>热处理</td><td>调质处理 217～255HBS</td><td>热处理</td><td></td><td>箱式电阻炉</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>40</td><td>钳</td><td>修研两端中心孔</td><td>机加</td><td>车</td><td>CA6140</td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

续表

序号	工序名称	工序内容	车间	工段	设备	工艺装备	工时	
							准终	单件
50	车	1. 双顶尖装夹。半精车三个台阶，螺纹大径车到 $\phi25$，P，N 两个台阶直径上留余量 0.5mm，车槽三个，倒角三个 2. 调头，双顶尖装夹，半精车余下的五个台阶，$\phi44$ 及 $\phi52$ 台阶车到图纸规定的尺寸。螺纹大径车到 $\phi24_{-0.2}^{-0.1}$，其余两个台阶直径上留余量 0.5mm，车槽三个，倒角四个 3. 双顶尖装夹，车一端螺纹 M24×1.5－6g，调头，双顶尖装夹，车另一端螺纹 M24×1.5－6g	机加	车	CA6140			
60	钳	划键槽及一个止动垫圈槽加工线	机加					
70	铣	铣两个键槽及一个止动垫圈槽，键槽深度比图纸规定尺寸多铣 0.25mm，作为磨削的余量	机加	铣	X52			
80	钳	修研两端中心孔	机加					
90	磨	磨外圆 Q 和 M 并用砂轮端面靠磨台 H 和 I。调头，磨外圆 N 和 P，靠磨台肩 G	机加	磨	M1432A			
100	检	检验						

										设计（日期）	校对（日期）	审核（日期）	标准化（日期）	会签（日期）
标记	处数	更改文件号	签字	日期	标记	处数	更改文件号	签字	日期					

4. 任务评价

任务完成以后，由学生对自己的成果进行讲解和交流，教师组织学生共同进行总结，根据任务完成情况，以及在项目组中的工作态度、参与程度、所起作用、合作能力等情况，对每个学生进行综合评价。任务实施检查与评价表见表 3-19。

表 3-19 任务实施检查与评价表

序号	检查内容	学生互评	教师评价	分值
1	零件图样识别是否充分，结构工艺分析是否正确，是否形成记录			10%
2	零件毛坯选择的可行性与正确性（毛坯图）			10%
3	零件加工顺序制订的合理性与可行性（机械加工工艺过程卡）			30%
4	重要工序内容确定的正确性与合理性（机械加工工序卡）			30%

续表

序号	检查内容		学生互评	教师评价	分值
5	职业素养	遵守时间：做到不迟到，不早退，中途不离开现场			5%
		5S：理实一体现场是否符合5S管理要求，桌椅、参考资料是否按规定摆放，地面、门窗是否干净			5%
		团结协作：组内是否配合良好；是否积极投入到本项目中积极完成本任务			5%
		语言能力：是否积极回答问题；条理是否清晰			5%
总评					

3.9　拓展项目

1. 任务案例

CA6140车床主轴如图3-73所示，材料为45钢，大批量生产。

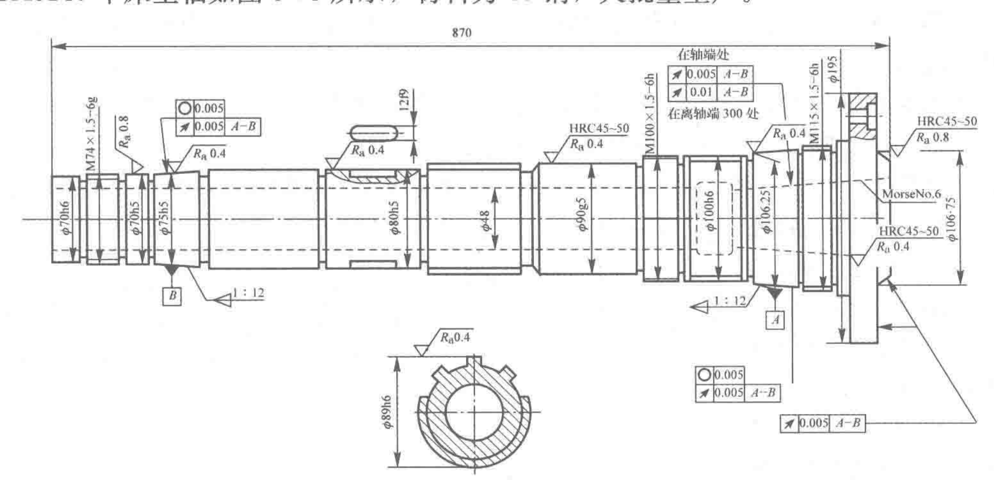


图3-73　CA6140车床主轴简图

2. 任务要求

编制CA6140车床主轴的机械加工工艺过程卡。

3. 任务实施

(1) 车床主轴的主要技术要求分析

1) 支承轴颈A，B是主轴部件的装配基准，它的制造精度直接影响主轴部件的回转精度，所以对支承轴颈A，B有很高的加工技术要求。即：圆跳动0.005，IT5级，R_a0.63μm。

2) 主轴莫氏锥孔是用来安装顶尖或工具锥柄的，其锥孔轴线必须与支承轴颈的基准轴线严格同轴，否则会使加工工件产生位置等误差。技术要求：圆跳动，近0.005，远0.01，R_a0.63μm，淬火达硬度为45～50HRC。

3) 主轴前端短锥C和端面D是安装卡盘的定位表面。为了保证卡盘的定位精度，这个圆

锥面也必须与支承轴颈的轴线同轴，端面与轴线垂直，否则将产生安装误差。即：圆跳动0.008，R_a1.25μm，淬火达硬度为HRC45～50。

4）配合轴颈是用来装齿轮完成传动工作的。技术要求：尺寸IT5～6级，R_a0.63μm。

5）其他表面：定位轴肩与中心线的垂直度，螺纹与中心线的同轴度等。

经过对主轴的结构特点与技术要求分析后，可根据生产批量、设备条件等因素，考虑主轴的工艺过程。

（2）车床主轴的加工工艺分析

1）定位基准的选择。轴类零件的定位基准，最常用的是两中心孔，它是辅助基准，工作时没有作用。在轴的加工中，零件各外圆表面，锥孔、螺纹表面的同轴度，端面对旋转轴线的垂直度及其相互位置精度的主要项目，这些表面的设计基准一般都是轴的中心线，若用两中心孔定位，符合基准重合的原则。中心孔不仅是车削时的定位基准，也是其他加工工序的定位基准和检验基准，又符合基准统一原则。当采用两中心孔定位时，还能够最大限度地在一次装夹中加工出多个外圆和端面。因此，只要有可能，就应尽量采用中心孔定位。但用两中心孔定位虽然定心精度高，但刚性差，尤其是加工较重的工件时不够稳固，切削用量也不能太大。粗加工时，为了提高零件的刚度，可采用轴的外圆表面和一中心孔作为定位基准来加工。即一夹一顶的方式，这种定位方法能承受较大的切削力矩，是轴类零件最常见的一种定位方法。

在加工空心轴的内孔时（如机床上莫氏锥度的内孔加工），不能采用中心孔作为定位基准，可用轴的两外圆表面作为定位基准。当工件是机床主轴时，常以两支承轴颈（装配基准）为定位基准，可保证锥孔相对支承轴颈的同轴度要求，消除基准不重合而引起的误差。

为了在通孔加工后还能用中心孔作定位基准，往往还采用带中心孔的锥堵或锥套心轴作为定位基准。如图3-74所示，锥堵或锥套心轴应具有较高的精度，锥堵和锥套心轴上的中心孔即是其本身制造的定位基准，又是空心轴外圆精加工的基准。因此必须保证锥堵或锥套心轴上锥面与中心孔有较高的同轴度。在装夹中应尽量减少锥堵的安装次数，减少重复安装误差。实际生产中，锥堵安装后，中途加工一般不得拆下和更换，直至加工完毕。

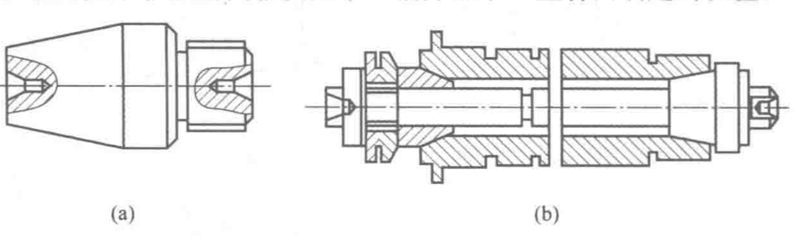


图3-74 锥堵和锥套心轴

（a）锥堵；（b）锥套心轴

从表3-20所示主轴加工工艺过程来看，定位基准的使用与转换如下：工艺过程一开始，以外圆为粗基准铣端面、钻中心孔，为粗车外圆准备好定位基准；车大端各部外圆，采用中心孔作为统一基准，并为深孔加工准备好定位基准；车小端各部，则使用已车过的一端外圆和另一端中心孔作为定位基准（一夹一顶方式）；钻深孔采用前后两挡外圆作为定位基准（一夹一托方式）；之后，先加工好前后锥孔，以便安装锥堵，为精加工外圆准备好定位基准；精车和磨削各挡外圆，均统一采用两中心孔作为定位基准；终磨锥孔之前，必须磨好轴颈表面，以便使用支承轴颈作为定位基准，使主轴装配基准和加工基准一致，消除基准不重

合引起的定位误差，获得锥孔加工精度。

2）加工阶段的划分。由于主轴是多阶梯带通孔的零件，切除大量的金属后会引起残余应力重新分布而变形，所以在安排工序时，应将粗精加工分开，以主要表面（特别是支承轴颈）的加工为主，分：粗加工阶段：主要指调质前的工序，半精加工阶段：主要是调质后到表面淬火间的工序，精加工阶段：主要是指表面淬火后的工序，其他次要表面适当穿插其中。

3）合理安排热处理工序。毛坯锻造后安排正火热处理是为了消除内应力，改善切削性能；粗加工之前安排调质处理是为了提高力学性能，为表面淬火准备；在半精加工之后安排表面淬火，主要是为使零件达到所要求的使用性能，提高耐磨性。

4）加工顺序的安排。应遵循基准先行、先粗后精、先主后次、穿插进行的原则，其主轴的加工顺序如下：锻造→正火→车端面钻中心孔→粗车→调质→半精车→精车→表面淬火→粗、精磨外圆表面→磨锥孔。

5）次要表面的加工安排。主轴上的花键、键槽、螺纹、横向小孔等次面表面的加工，通常均安排在外圆精车，粗磨之后或精磨外圆之前进行。这是因为如果在精车前就铣出键槽，精车时因断续切削而产生振动，既影响加工质量又容易损坏刀具；另一方面，也难以控制键槽的深度尺寸。但是这些加工也不宜放在主要表面精磨之后，以免破坏主要表面已获得的精度。主轴上的螺纹有较高的要求，应注意安排在最终热处理（局部淬火）之后，以克服淬火后产生的变形，而且车螺纹使用的定位基准与精磨外圆使用的基准应当相同，否则也达不到较高的同轴度要求。

（3）车床主轴的机械加工工艺过程

车床主轴机械加工工艺过程见表3-20。

表3-20　车床主轴机械加工工艺过程卡

工序号	工序名称	工序内容	定位基准	设备
1	备料			
2	精锻	精密锻造毛坯		立式精锻机
3	热处理	正火		
4	锯头			
5	铣端面 打中心孔	铣两端面，保证全长870mm，两端钻中心孔		专用中心孔机床
6	车	粗车各外圆面		卧式车床
7	热处理	调质220～240HBS		
8	车	车大端各部，法兰外圆至ϕ198mm，短圆锥外圆至$\phi 108_{0}^{+0.15}$mm	两端中心孔	卧式车床
9	车	仿形车小端各外圆，加工后直径余量为1.2～1.5mm	大端$\phi 108_{0}^{+0.15}$mm外圆，小端中心孔	仿形车床
10	钻	钻ϕ48mm的深孔	大端M115螺纹，小端ϕ70mm外圆和端面	深孔钻床

续表

工序号	工序名称	工序内容	定位基准	设备
11	车	车小端内锥孔（配 1 ∶ 20 锥堵）孔口 $\phi52^{0}_{-0.2}$mm	大端 $\phi108^{+0.15}_{0}$mm 外圆，小端外圆可调支承	卧式车床
12	车	车大端莫氏锥孔，孔口 $\phi63\pm0.05$mm，车前端圆锥面及端面	前支承轴颈外圆，$\phi70$mm 外圆和端面	卧式车床
13	钻	钻大端法兰盘上各孔，锪沉孔，攻螺纹	莫氏 6 号锥孔	钻床，钻模
14	热处理	高频淬火 $\phi90$g6mm，短锥及莫氏 6 号锥孔，45～50HRC		
15	车	精车小端各外圆，留直径余量 0.4mm，切槽	两锥堵中心孔	数控车床
16	磨	粗磨两端外圆 $\phi90.4$h8 至 $\phi90$g5 和 $\phi75.25$h8 至 $\phi75$h5	两锥堵中心孔	外圆磨床
17	磨	粗磨莫氏 6 号锥孔，孔口尺寸 $\phi63.15\pm0.05$	前支承轴颈外圆，$\phi70$mm 的外圆和端面	内圆磨床
18	铣	粗精铣花键	两锥堵中心孔	花键铣床
19	铣	铣键槽 12f9mm	$\phi80.4$mm 的外圆，端面	立式铣床
20	车	车大端法兰内端面，外圆 $\phi195$mm，和三段螺纹 M115×1.5，M100×1.5，M74×1.5（配螺母）	两锥堵中心孔	卧式车床
21	磨	粗精磨各外圆及两台阶面，达图样要求	两锥堵中心孔	外圆磨床
22	磨	粗精磨两 1∶12 的支承轴颈锥面及短锥面及大端法兰外侧面达图纸要求	两锥堵中心孔	专用组合磨床
23	磨	（卸锥堵）精磨莫氏 6 号锥孔达图纸要求尺寸	$\phi100$h6 和 $\phi80$h5 的外圆，小端孔口	主轴锥孔磨床
24	检验	按图纸技术要求项目检查		

习题

1. 一般轴类零件的外圆表面加工方法有哪些？如何选择？
2. 卧式车床的工艺范围有哪些？
3. 万能外圆磨床的典型加工方式有哪几种？
3. 普通高速钢有什么特点？常用的牌号有哪些？主要用来制造什么刀具？
4. 常用的硬质合金牌号有哪几大类？一般如何选用？
5. 刀具的标注角度有哪些？各有什么特点？如何选择刀具的几何参数？
6. 常用的车刀有哪几种结构类型？各有何特点？
7. 砂轮的特性主要由哪些因素决定？一般如何选用砂轮？
8. 机床夹具一般由哪些部分组成？各自的作用是什么？
9. 什么是六点定位原理？工件的定位状态有哪几种？

10. 夹紧装置主要由哪些部分组成？确定夹紧力的原则是什么？

11. 车削轴类工件时，常用哪几种装夹方法？各有什么特点？

12. 装夹细长轴时，可采用哪些辅助支承以增加工件的刚度？

13. 轴类零件常用的测量仪器有哪些？试述 0.02mm 游标卡尺的读数原理。

14. 蜗杆轴如图 3-75 所示，材料为 40Cr，调质处理为 217～255HBS，中小批量生产，试编写蜗杆轴的机械加工工艺过程，并说明在所制定的工艺过程中采用什么方法来保证蜗杆轴的技术要求。

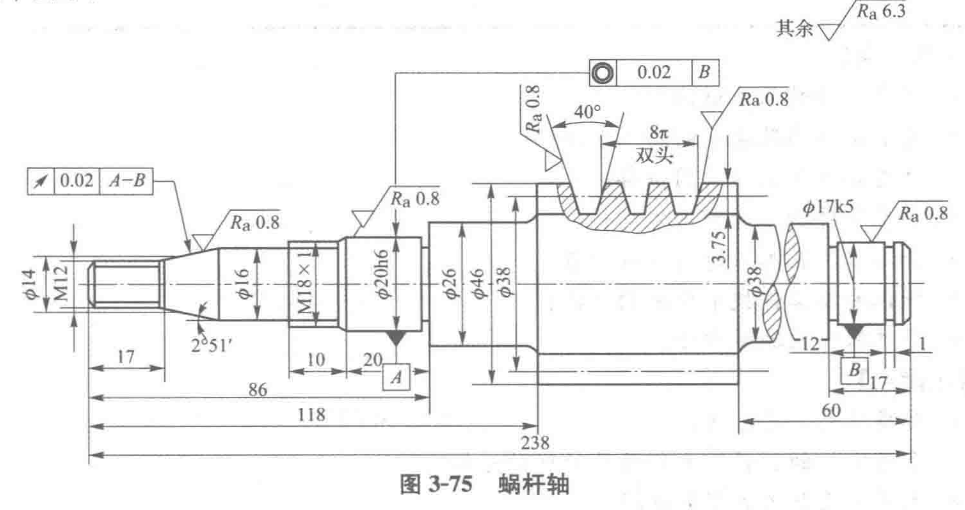


图 3-75　蜗杆轴

项目四　套类零件加工工艺

【知识点】

- 套类零件的基本概念；
- 套类零件内孔表面的加工方法；
- 套类零件加工的常用设备；
- 套类零件加工的常用刀具；
- 套类零件孔加工时的切削用量；
- 保证套类工件技术要求的方法；
- 套类零件的测量方法。

【技能点】

- 套类零件工艺分析；
- 套类零件的材料、毛坯及热处理的选择；
- 内孔表面加工方案的选择；
- 套类零件加工设备与装备的选择；
- 套类零件的测量方法；
- 编制简单套类零件机械加工工艺过程卡；
- 编制简单套类零件机械加工工序卡；
- 编写较复杂套类零件的工艺路线。

4.1　项目导入

1. 任务案例

定位套如图 4-1 所示，材料为 HT200，中小批量生产。图中未注倒角为 1×45°。

2. 任务要求

编制定位套的机械加工工艺过程卡和工序卡。

3. 任务引导

1）阅读零件图，对零件进行工艺分析，判断其加工工艺性如何？

2）零件毛坯如何选择，毛坯尺寸如何确定？

3）套类零件内孔表面加工方法有哪些？如何确定定位套的内孔表面加工方案？

4）加工定位套需要什么样的设备和刀具？如何确定每道工序的切削用量？

5）怎样把定位套装夹在机床上？

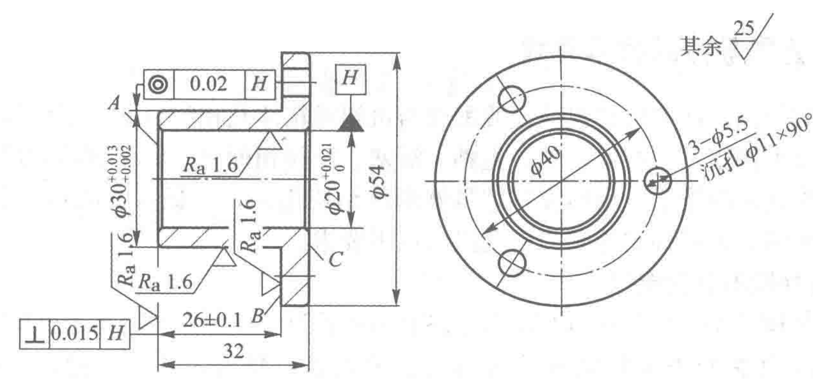


图 4-1　定位套

6）怎样测量定位套的加工精度？

4.2　套类零件工艺分析

4.2.1　套类零件的功用及结构特点

套类零件是指在回转体零件中的空心薄壁件，是机械加工中常见的一种零件，在各类机器中应用很广泛，主要起支承或导向作用。由于功用不同，其形状结构和尺寸有很大的差异。常见的套类零件有支承回转轴的各种形式的轴承圈、轴套，夹具上的钻套和导向套，内燃机上的气缸套和液压系统中的液压缸、电液伺服阀的阀套等。其大致的结构形式如图 4-2 所示。

套类零件的结构与尺寸随其用途不同而异，但其结构一般都具有以下特点：外圆直径 d 一般小于其长度 L，通常 $L/d<5$；内孔与外圆直径之差较小，故零件壁的厚度较薄且易变形；内、外圆回转面的同轴度要求较高；结构比较简单。

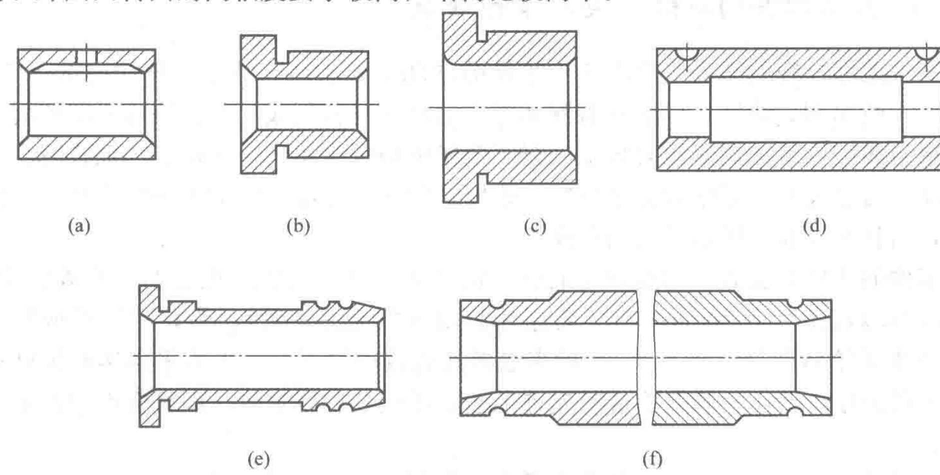


图 4-2　套类零件的结构形式

（a）滑动轴承；（b）滚动轴承；（c）钻套；（d）轴承衬套；（e）气缸套；（f）液压缸

4.2.2 套类零件的技术要求

套类零件的外圆表面多以过盈或过渡配合与机架或箱体孔相配合起支承作用。内孔主要起导向作用或支承作用，常与运动轴、主轴、活塞、滑阀相配合。有些套筒的端而或凸缘端面有定位或承受载荷的作用。套筒类零件虽然形状结构不一，但仍有共同特点和技术要求，根据使用情况可对套类零件的外圆与内孔提出以下要求。

1. 内孔与外圆的精度要求

外圆直径精度通常为IT5～IT7，表面粗糙度值为R_a5～0.63μm，要求较高的可达R_a0.04μm；内孔作为套类零件支承或导向的主要表面，要求内孔尺寸精度一般为IT6～IT7，为保证其耐磨性要求，对表面粗糙度要求较高，一般为R_a2.5～0.16μm。有的精密套筒及阀套的内孔尺寸精度要求为IT4～IT5，也有的套筒（如油缸、气缸缸筒）由于与其相配的活塞上有密封圈，故对尺寸精度要求较低，一般为IT8～IT9，但对表面粗糙度要求较高，通常为R_a2.5～1.6μm。

2. 几何形状精度要求

通常将外圆与内孔的几何形状精度控制在直径公差以内即可；对精密轴套有时控制在孔径公差的1/3～1/2，甚至更严格。对较长套筒除圆度有要求以外，还应有孔的圆柱度要求。为提高耐磨性，有的内孔表面粗糙度要求为R_a1.6～0.1μm，有的高达R_a0.025μm。套筒类零件外圆形状精度一般应在外径公差内，表面粗糙度值为R_a3.2～0.4μm。

3. 位置精度要求

位置精度要求主要应根据套类零件在机器中的功用和要求而定。如果内孔的最终加工是在套筒装配（如机座或箱体等）之后进行，则可降低对套筒内、外圆表向的同轴度要求；如果内孔的最终加工是在装配之前进行，则同轴度要求较高，通常同轴度为0.01～0.06mm。套筒端面（或凸缘端面）常用来定位或承受载荷，对端面与外圆和内孔轴心线的垂直度要求较高，一般为0.02～0.05mm。

4.2.3 套类零件的材料、毛坯及热处理

套类零件毛坯材料的选择主要取决于零件的功能要求、结构特点及使用时的工作条件。套筒类零件一般用钢、铸铁、青铜或黄铜和粉末冶金等材料制成。有些特殊要求的套类零件可采用双层金属结构或选用优质合金钢，双层金属结构是应用离心铸造法在钢或铸铁轴套的内壁上浇注一层巴氏合金等轴承合金材料，采用这种制造方法虽增加了一些工时，但能节省有色金属，而且又提高了轴承的使用寿命。

套类零件的毛坯制造方式的选择与毛坯结构尺寸、材料和生产批量的大小等因素有关。孔径较大（一般直径大于20mm）时，常采用型材（如无缝钢管）、带孔的锻件或铸件；孔径较小（一般直径小于20mm）时，一般多选择热轧或冷拉棒料，也可采用实心铸件；大批量生产时，可采用冷挤压、粉末冶金等先进工艺，不仅节约原材料，而且生产率及毛坯质量均可提高。

套类零件的功能要求和结构特点决定了套类零件的热处理方法有渗碳淬火、表面淬火、调质、高温时效及渗氮等。

4.3　套类零件内孔表面加工方法

4.3.1　内孔表面加工方法

孔或内圆的表面是盘、套、支架、箱体和大型简体等零件的重要表面之一，也可能是这些零件的辅助表面。孔的机械加工方法较多。中、小孔一般靠刀具本身尺寸来获得被加工孔的尺寸，如钻、扩、锪、车、铰、拉孔等；较大的孔则需采用其他方法，如立车、镗、磨孔等。

1. 钻孔

用钻头在工件实体部位加上孔的方法称为钻孔。钻孔属于孔的粗加工，多用作扩孔、铰孔前的预加工，或加工螺纹底孔和油孔。精度等级为 IT11～IT13，表面粗糙度为 R_a12.5μm。

钻孔主要在钻床和车床上进行，也常在镗床和铣床上进行。在钻床、镗床上钻孔时，由于钻头旋转而工件不动，在钻头刚性不足的情况下，钻头引偏就会使孔的中心线发生歪曲，但孔径无显著变化。如在车床上钻孔，因为是工件旋转而钻头不转动，这时钻头的引偏只会引起孔径的变化并产生锥度、腰鼓等缺陷，但孔的中心线是直的，且与工件回转中心一致。故钻小孔和深孔时，为了避免孔的轴线偏移和不直，应尽可能在车床上进行。钻头引偏引起的加工误差如图 4-3 所示。

(a)　(b)

图 4-3　钻头引偏引起的加工误差

(a) 钻床、镗床上钻孔；(b) 车床上钻孔

2. 扩孔

扩孔是用扩孔钻对已钻出、铸出、锻出或冲出的孔进行再加工，以扩大孔径并提高精度和减小表面粗糙度的方法。扩孔精度可达 IT10，表面粗糙度为 R_a12.5～6.3μm。扩孔属于孔的半精加工，常用作铰孔等精加工前的准备工序，也可作为精度要求不高的孔的最终工序。一般工件的扩孔，可用麻花钻。对于孔的半精加工，可用扩孔钻。扩孔可以在一定程度上校正钻孔的轴线偏斜，其加工质量和生产率比钻孔高。由于扩孔钻的结构刚性好，刀刃数目较多，且无端部横刃，加工余量较小（一般为 2～4mm），故切削时轴向力小，切削过程平稳，因此可以采用较大的切削速度和进给量。如果采用镶有硬质合金刀片的扩孔钻，切削速度还可提高 2～3 倍，使扩孔的生产率进一步提高。当孔径大于 100mm 时，一般采用镗孔而不用扩孔。扩孔使用的机床与钻孔相同。用于铰孔前的扩孔钻，其直径偏差为负值，用于终加工的扩孔钻，其直径偏差为正值。

3. 铰孔

铰孔是在半精加工（扩孔或半精镗孔）基础上进行的一种孔的精加工方法，其精度可达 IT6～IT8，表面粗糙度为 R_a1.6～0.4μm。铰孔有手铰和机铰两种方式，在机床

上进行的铰削称为机铰，用手工进行的铰削称为手铰。

铰孔之前，一般先经过车孔或扩孔后留些铰孔余量。余量的大小直接影响铰孔的质量。余量太小，往往不能把前道工序所留下的加工痕迹铰去。余量太大，切屑挤满在铰刀的齿槽中，使切削液不能进入切削区，严重影响表面粗糙度，或使切削刃负荷过大而迅速磨损，甚至崩刃。铰孔余量一般是：高速钢铰刀为 0.08～0.12mm，硬质合金铰刀为 0.05～0.20mm。为避免产生积屑瘤和引起振动，铰削应采用低切速，一般粗铰钢件为 v=0.07～0.12m/s，精铰为 v=0.03～0.08m/s。机铰进给量为钻孔的 3～5 倍，一般为 0.2～1.2mm/r，以防出现打滑和啃刮现象。铰削应选用合适的切削液，铰削钢件时常采用乳化液，铰削铸件时用煤油。

机铰刀在机床上常采用浮动连接。浮动机铰或手铰时，一般不能修正孔的位置误差，孔的位置误差应由铰孔前的工序来保证。铰孔直径一般不大于 80mm，铰削也不宜用于非标准孔、台阶孔、盲孔、短孔和具有断续表面的孔的加工。

4. 锪孔

用锪削方法加工平底或锥形沉孔，叫做锪孔。锪孔一般在钻床上进行，加工的表面粗糙度为 R_a6.3～3.2μm。有些零件钻孔后需要孔口倒角，有些零件要用顶尖顶住孔口加工外圆，这时可用锥形锪钻在孔口锪出内圆锥。

5. 车孔

铸造孔、锻造孔或用钻头钻出的孔，为了达到所要求的精度和表面粗糙度，还需要车孔。

车孔是常用的孔加工方法之一，可以作粗加工，也可以作精加工，加工范围很广泛。车孔精度一般可达 IT7～IT8，表面粗糙度为 R_a3.2～1.6μm，精细车削可以达到更小(R_a0.8μm)。

车孔的关键技术是解决内孔车刀的刚性和排屑问题。增加内孔车刀的刚性主要采取以下两项措施。

(1) 尽量增加刀杆的截面积

一般的内孔车刀有一个缺点，刀杆的截面积小于孔截面积的 1/4，如果让内孔车刀的刀尖位于刀杆的中心线上，这样刀杆的截面积就可达到最大限度。

(2) 刀杆的伸出长度尽可能缩短

如果刀杆伸出太长，就会增加刚性，容易引起振动。因此，为了增加刀杆刚性，刀杆伸出长度只要略大于孔深即可。而且，要求刀杆的伸长能根据孔深加以调节。

解决排屑问题主要是控制切屑流出方向。精车孔时，要求切屑流向待加工表面（前排屑）。前排屑主要是采用正刃倾角内孔车刀。

6. 镗孔

镗孔是用镗刀对已有的孔进行进一步加工的加工方法。对于直径较大的孔（一般 d>100mm）、内成形面或孔内环槽等，几乎全部采用镗孔的方法。一般镗孔精度可达 IT8～IT7，表面粗糙度值为 R_a1.6～0.8μm；精细镗时，精度可达 IT7～IT6，表面粗糙度值为 R_a0.8～0.2μm。镗孔可以在多种机床上进行，其加工方式有以下 3 种，如图 4-4 所示。

(1) 工件旋转刀具作进给运动

如图 4-4 (a) 所示，在车床类机床上加工盘类零件属于这种方式。其特点是加工后孔的

轴线和工件的回转轴线一致，孔轴线的直线度好，能保证在一次装夹中加工的外圆和内孔有较高的同轴度，并与端面垂直。刀具进给方向不平行于回转轴线或不呈直线运动，都不会影响轴线的位置和直线度，也不影响孔在任何一个截面内的圆度，仅会使孔径发生变化，产生锥度、鼓形、腰形等缺陷。

(2) 工件不动而刀具作旋转和进给运动

如图 4-4 (b) 所示，这种加工方式是在镗床类机床上进行的。这种方式也能基本保证镗孔的轴线和机床主轴轴线一致，但随着镗杆伸出长度的增加，镗杆变形加大会使孔径逐步减小。此外，镗杆及主轴自重引起的下垂变形也会导致孔轴线弯曲。如果镗削同轴线多孔时，则会加大这些孔的不同轴度，故这种方式适于加工孔深不大而孔径较大的壳体孔。

(3) 刀具旋转工件作进给运动

如图 4-4 (c) 所示，这种加工方式适用于镗削箱体两壁相距较远的同轴孔系，易于保证孔与孔、孔与平面间的位置精度。镗孔时进给运动方向发生偏斜或非直线性都不会影响孔径。但镗孔的轴线相对于机床主轴线会产生偏斜或不成直线，使孔的横截面形状呈椭圆形。镗杆与机床主轴间多用浮动连接，以减少主轴误差对加工精度的影响。

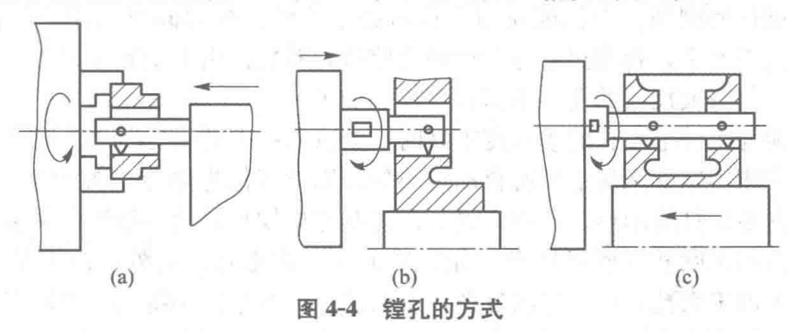


图 4-4 镗孔的方式

(a) 工件旋转刀具作进给运动；
(b) 工件不动而刀具作旋转和进给运动；
(c) 刀具旋转工件作进给运动

镗孔常用的是结构简单的单刀镗刀，刀具受到孔径尺寸的限制，刚性较差，容易发生振动。切削用量比车削外圆小，镗孔的尺寸要依靠调整刀具来保证。因此，镗孔比车外圆以及扩孔、铰孔的生产率低。但在单件小批生产中，镗孔可以避免准备大量不同尺寸的扩孔钻和铰刀，故是一种比较经济的加工方法。粗镗孔的精度为IT11～IT13，表面粗糙度值为 R_a12. 5～6. 3μm；半精镗的精度为 IT9～IT10，R_a 为 3. 2～1. 6μm；精镗的精度为 IT7～IT8，R_a 为 1. 6～0. 8μm；精细镗的精度可达 IT6，R_a 为 0. 4～0. 1μm。

7. 拉孔

拉孔是用特制的拉刀在拉床上进行的孔加工方法。拉孔是也一种高生产率的精加工方法，既可加工内表面也，可加工外表面，如图 4-5 所示。拉孔前工件须经钻孔或扩孔。工件以被加工孔自身定位并以工件端面为支承面，在一次行程内便可完成粗加工—精加工—光整加工等阶段的工作。拉孔一般没有粗拉工序和精拉工序之分，除非拉削余量太大或孔太深，用一把拉刀拉，拉刀太长，才分为两个工序加工。

拉孔的拉削速度低，每齿切削厚度很小，拉削过程平稳，不会产生积屑瘤；同时拉刀是定尺寸刀具，又有校准齿来校准孔径和修光孔壁，所以拉削加工精度高，表面粗糙度小。拉孔精度主要取决于刀具，机床对其影响不大。拉孔的精度可达 IT6～IT8，表面粗糙度可达

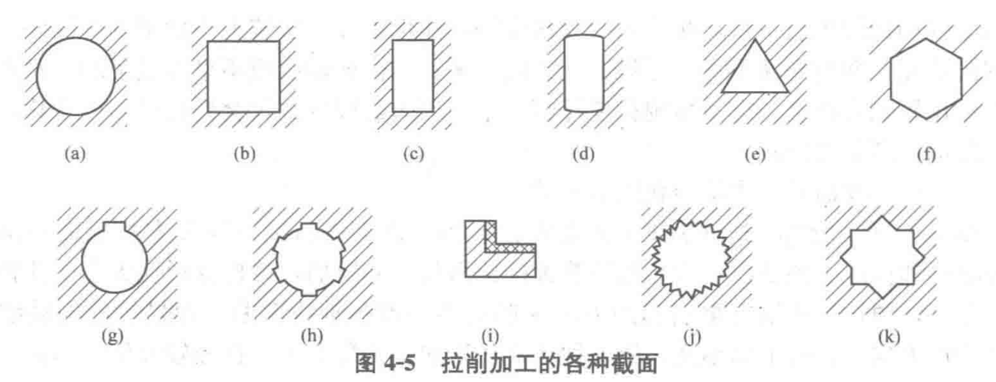


图 4-5　拉削加工的各种截面

(a) 圆孔；(b) 方孔；(c) 长方孔；(d) 鼓形孔；(e) 三角孔；(f) 六角孔；
(g) 键槽；(h) 花键槽；(i) 相互垂直平面；(j) 齿纹孔；(k) 多边形孔

0.8～0.4μm。由于拉孔难以保证孔与其他表面间的位置精度，因此被拉孔的轴线与端面之间在拉削前应保证有一定的垂直度。

如图 4-6 所示，拉刀刀齿尺寸逐个增大而切下金属的过程，可看做是按高低顺序排列成队的多把刨刀进行的刨削。为保证拉刀工作时的平稳性，拉刀同时工作的齿数应在 2 个以上，但也不应大于 8 个，否则拉力过大可能会使拉刀断裂。由于受到拉刀制造工艺及拉床动力的限制，过小与特大尺寸的孔均不适宜于拉削加工。

当工件端面与工件毛坯孔的垂直度不好时，为改善拉刀的受力状态，防止拉刀崩刃或折断，常采用在拉床固定支承板上装有自动定心的球面垫板作为浮动支承装置。

拉刀结构复杂、排屑困难、价格昂贵、设计制造周期长，故一般用于大批量生产中。

拉削不仅能加工圆孔，而且还可以加工成形孔、花键孔。另外，由于拉刀是定尺寸刀具，不适合用于加工大孔，而且形状复杂，价格昂贵，在单件小批生产中使用也受限制，故拉孔常用在大批量生产中加工孔径为 8～125mm、孔深不超过孔径 5 倍的中、小件通孔。

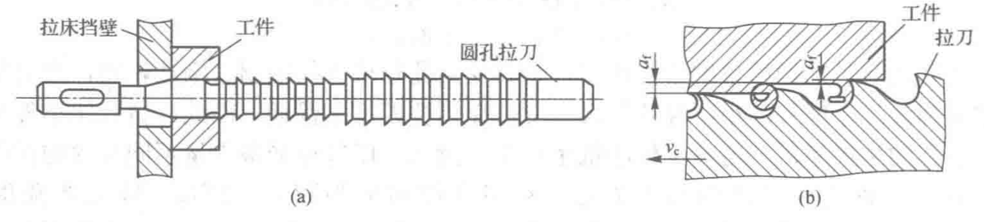


图 4-6　拉孔及拉刀刀齿的切削过程

(a) 拉孔；(b) 拉刀刀齿的切削过程

8. 磨孔

磨孔是孔精加工的方法之，如图 4-7 所示。磨孔精度可达 IT7，表面粗糙度值为 R_a1.6～0.4μm。

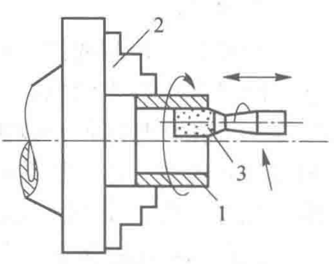


图 4-7　内孔磨削示意图

1—工件；2—卡盘；3—砂轮

磨孔与磨外圆相比较，工作条件较差：砂轮直径受到孔径的限制，磨削速度低：砂轮轴受到工件孔径和长度的限制，刚性差而容易变形；砂轮与工件接触面积大，单位面积压力小，使磨钝的磨料不易脱落；切削液不易进入磨削区，磨屑排除和散热困难，工件易烧伤，砂轮磨损快、易堵塞，需要经常修整和更换。因此，磨孔的质量和生产率都不如磨外圆。但是，磨

孔的适应性好，在单件小批生产中应用很广泛。特别是对淬硬的孔、盲孔、人直径的孔（用行星磨削）、长度短的精密孔以及断续表面的孔（带链槽或花键孔），内孔磨削是主要的加工方法。增加内孔磨头的转速和采用自动化程度高的内孔磨床，是提高内孔磨削生产率的主要途径。如采用 100 000r/min 风动磨头，可以磨削小直径的孔而获得较好的质量和较高的生产率。

9. 珩磨孔

珩磨是孔光整加工的方法之一，常在专用的珩磨机上用珩磨头进行加工。图 4-8 所示为一种利用螺纹加压式珩磨头。本体 2 通过浮动联轴节和机床主轴连接，磨条 5 用机械方法和磨条座 4 结合而装人本体的槽中，磨条座两端由弹簧箍 1 箍住，使磨条经常向内收缩。珩磨头工作尺寸的凋节依靠调节锥 6 实现，旋转螺母 7 使其向下时，就推动凋节锥向下移动，通过磨条顶块 3 使磨条径向张开而获得工作压力；若旋转螺母 7 使其向上时，压力弹簧 8 便推动调节锥向上，磨条受到弹簧箍的作用而收缩。这种珩磨头结构简单，但操作不便，只用于单件小批生产。大批量生产中常用压力恒定的气动或液压加压的珩磨头。珩磨时，工件固定在机床工作台上，主轴驱动珩磨头作旋转和往复运动（见图 4-9（a）），使珩磨头上磨条在孔的表面上切削去极薄的一层金属，其切削轨迹成交叉而不重复的网纹，如图 4-9（b）所示。

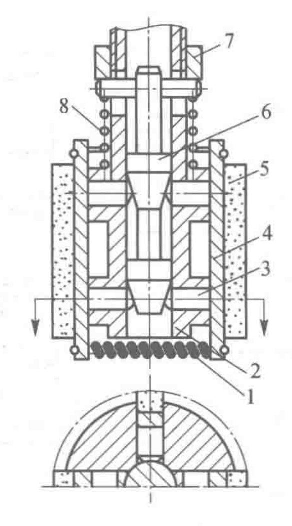


图 4-8 珩磨头

1—弹簧箍；2—本体；3—磨条顶块；
4—磨条座；5—磨条；6—调节锥；
7—螺母；8—压力弹簧

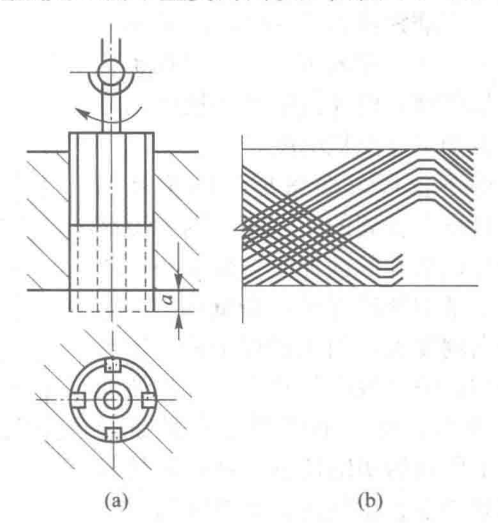


图 4-9 珩磨孔时的运动及切削轨迹

（a）珩磨时的运动方向；
（b）珩磨时的切削轨迹

珩磨孔时的主要工艺参数有以下几种：

1）珩磨余量直接影响加工质量和生产率，加工钢件时为 0.01～0.06 mm，加工铸铁时为 0.02～0.2mm，孔径大时取大值。粗珩切去余量的 2/3～4/5，精珩只是修平粗珩留下的凸峰。

2）珩磨的圆周速度和往复速度增加，可以提高生产率，但过高则会使发热量增大并加速磨条的磨损。一般珩磨钢件时珩磨头圆周速度取 40～60 m/min，往复速度取 10～12 m/min。珩磨铸铁时，圆周速度取 60～75 m/min，往复速度取 15～20 m/min。适当调整珩

磨头往复速度与圆周速度之比，可获得合理的网纹交叉角 θ。粗珩时，为提高切削效率，θ 取40°～60°，精珩时 θ 取 20°～40°，以获得小的表面粗糙度。

3）珩磨时磨条与工件表面的压力不宜过大，粗珩时取 0.5～2MPa，精珩时取 0.2～0.8MPa。

4）磨条选择的一般原则和砂轮特性的选择相同，如表而粗糙度要求越小，则粒度越细。表面粗糙度 R_a 为 0.8～0.4μm 时，粒度为 W120～W40；R_a 为 0.4～0.2μm 时，粒度为 W40～W20；$R_a \leqslant 0.1\mu m$ 时，粒度为 W20～W14。磨条硬度一般为 R_3～ZY_1。磨条长度对珩磨孔母线的直线度影响较大，通常应根据被珩磨孔的长度来确定。当珩磨长孔时，$L_{磨条} \approx (1/2) L_{孔}$；当珩磨短孔（孔径大于孔长）时，$L_{磨条} \approx (2/3 \sim 3/4) L_{孔}$，如图 4-10（a）所示。磨条工作时在孔两端的超程量一般可取 $a=(1/3 \sim 1/4)L_{磨条}$，故珩磨时工作行程长度 $L=L_{孔}+2a-L_{磨条}$。磨条增长则行程减短，可提高生产率，但磨条过长会引起切制不均匀，影响孔的形状精度。超程量 a 选择不当，则会导致喇叭形成腰鼓形误差，如图 4-10（b）所示。磨条的数量为 3～12 块，随孔径的增大而增多；少于 3 块，则不易修整孔的几何形状误差。但孔径很小时，可以减至 1～2 块磨条，加工 1～2 根胶木或硬质合金导向块，以保证珩磨时的导向。

（5）珩磨钢件和铸铁时，常用 60%～90%的煤油，加入 10%～40%的硫化油作为切削液，以冲洗磨屑和脱落的磨粒，改善加工表面粗糙度。

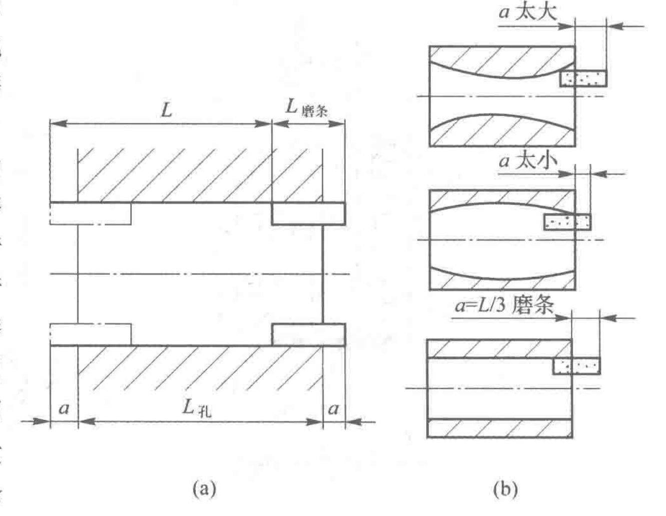


图 4-10 磨条长度对珩孔的影响

（a）珩磨短孔；（b）珩磨孔误差形状

珩磨不仅可以获得加工质量高的孔，而且也有较高的生产率。因为珩磨前孔径经过准确的预加工，余量小。珩磨头与上轴向浮动连接，余量均匀。珩磨头径向刚度大，加工过程平稳。珩磨时磨条与孔壁接触面积较大，参加切削的磨粒数多，属于小切削力的微量切削，加工珩磨的切削速度较低，发热量少，不易产生表面烧伤，细粒度的磨条和具有不重复的网状轨迹有利于减小表面粗糙度值，故加工的尺寸精度可达 IT5 ～ IT7，表面粗糙度为 R_a 0.4～0.012μm，圆度和圆柱度可达 0.003～0.005mm。珩磨头的转速虽然较低，但往复速度较高，参加切削的磨粒很多，能很快地切除金属，故生产率比内孔磨、精细镗都高。由于珩磨头与主轴是浮动连接的，珩磨时以孔本身定位，因此不能提高孔的位置精度。珩磨可以加工铸铁和钢件，但不宜加工易堵塞磨条的铜、铝等韧性金属。珩磨加工孔径的范围为 5～500mm，还可以加工长径比 $L/d>10$ 的深孔（如液压缸孔）。因此，珩磨在汽车、拖拉机以及机床、煤矿机械、液压件生产等部门，都得到了广泛的应用。

10. 研磨孔

研磨孔的原理与研磨外圆相同。研具是用铸铁制成的研棒。图 4-11 所示为可调式研磨

棒，通过旋转调节螺母 2、5，借心杆 1 锥体的作用，可调节研磨套 3 的径向尺寸。一般研磨棒外径应比工件内孔小 0.01～0.025mm，以保证磨粒能在此间隙内运动。这种研具可以供粗研和精研共用。研磨内孔一般可在车床或钻床上进行。研磨的尺寸精度可达 IT6 级，表面粗糙度 R_a 为 0.16～0.01μm，但生产率低，故研磨前孔必须经过磨削、精镗或精铰等工序，尽量减少加工余量，对于中、小尺寸孔，研磨余量约为 0.025mm。此外，研磨孔的位置精度需由前工序来保证。

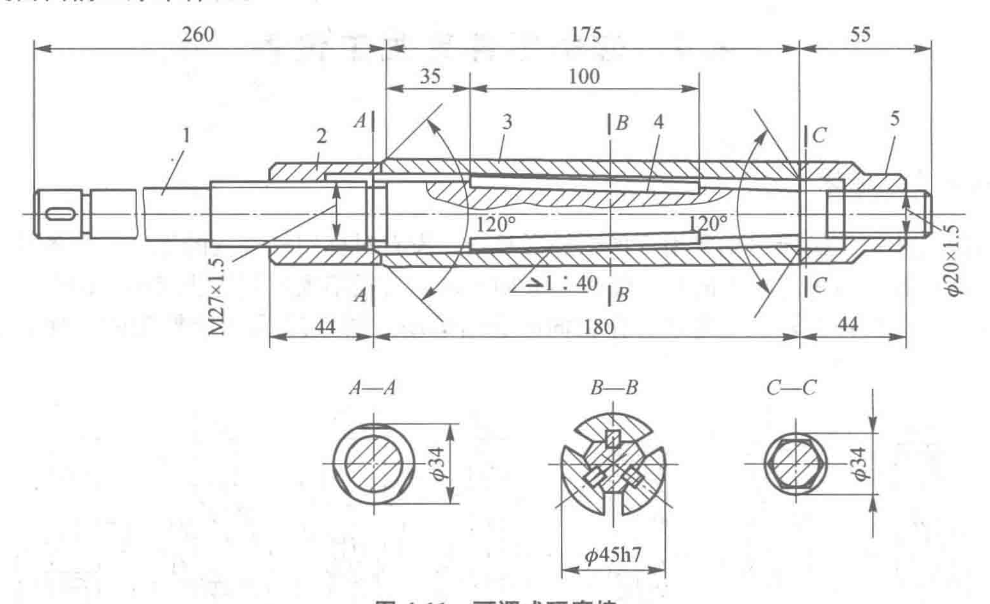


图 4-11　可调式研磨棒

1—心杆；2，5—调节螺母；3—研磨套；4—键

4.3.2　内孔表面加工方案的选择

以上介绍了孔的常用加工方法、原理以及可达到的精度和表面粗糙度。但要达到孔表面的设计要求，一般只用一种加工方法是达不到的，而往往要由几种加工方法顺序组合，即选用合理的加工方案。内孔表面的加工则比较复杂，要考虑其结构特点、孔径大小、长径比大小、加工精度和表面粗糙度以及生产规模、材料的热处理要求和生产条件等因素。

例如，“钻—扩—铰”和“钻—扩—拉”两种加工方案能达到的技术要求基本相同，但后一种的加工方案在大批大量生产中采用较为合理。再如“粗镗—半精镗—精镗”和“粗镗—半精镗—磨孔”两种加工方案达到的技术要求也基本相同，但如果内孔表面经淬火后只能用磨孔方案，而材料为有色金属时以采用精镗方案为宜，如加工未经淬硬的工件则两种方案均能采用，这时可根据生产现场设备等情况来决定加工方案。常用的内孔表面加工方案见表 2-8。

为了保证孔的加工要求，在制定孔的加工方案时，应遵循以下基本原则。

1）孔径较小时（如 30～50mm 以下），大多采用“钻—扩—铰”方案。批量大的生产，则可采用钻孔后拉孔的加工方案，其精度稳定，生产率高。

2）孔径较大时，大多采用钻孔后镗孔或直接镗孔的方案。缸筒类零件的孔在精镗后通

常还要进行珩磨或滚压加工。

3）淬硬套筒零件，多采用磨孔方案，可获得较高的精度和较细的表面粗糙度。对于精密套筒，相应增加孔的光整加工，如高精度磨削、珩磨、研磨、抛光等加工方法孔加工方法的选择，需根据孔径大小、深度与孔的精度、表面粗糙度以及零件结构形状、材料与孔在零件上的部位而定。

4.4 套类零件孔加工设备

4.4.1 钻床

钻床是孔加工机床，主要用于加工外形复杂、没有对称回转轴线的工件，如各种杆件支架件、板件和箱体等零件上的孔。钻床一般用于加工直径不大且精度要求不高的孔。加工时工件固定，刀具作旋转的上运动并作轴向的进给运动。图 4-12 所示为钻床的几种典型加工表面。

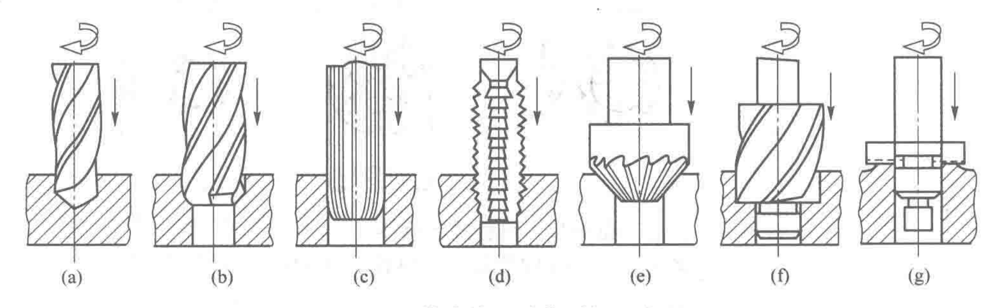


图 4-12　钻床的几种典型加工表面

(a) 钻孔；(b) 扩孔；(c) 铰孔；(d) 攻螺纹；(e) 倒角；(f) 锪孔；(g) 锪平面

钻床的主参数为最大钻孔直径。钻床的主要类型有台式钻床、立式钻床、摇臂钻床和各种专门化钻床。

1. 台式钻床

图 4-13 所示为台式钻床的外形。机床主轴用电动机经一对塔轮以 V 带传动，刀具用主轴前端的夹头夹紧，通过齿轮齿条机构使主轴套筒作轴向进给。台式钻床只能加工较小工件上的孔，但其结构简单、体积小、使用方便，在机械加工和修理车间中广泛使用。

2. 立式钻床

图 4-14 所示为立式钻床的外形，主轴箱内有主运动及进给运动的传动与换置机构，刀具安装在主轴的锥孔内，由主轴带动作旋转主运动，主轴套筒可以手动或机动作轴向进给。工作台可沿立柱上的导轨作调位运动。工件用工作台上的虎钳夹紧，或用压板直接固定在工作台上加工。立式钻床的主轴中心线是固定的，必须移动工件使被加工的中心线与主轴中心线对准。所以，立式钻床只适用于在单件小批量生产中加工中、小型工件。

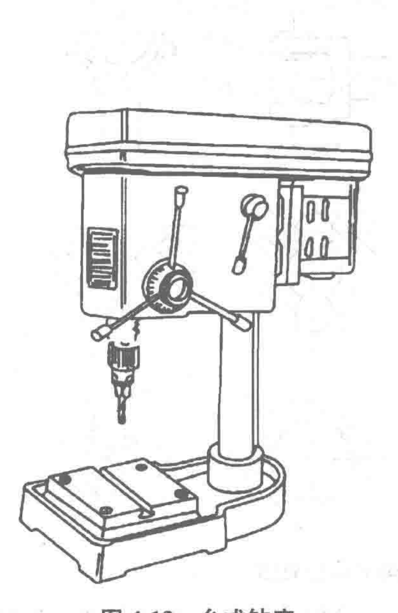


图 4-13　台式钻床

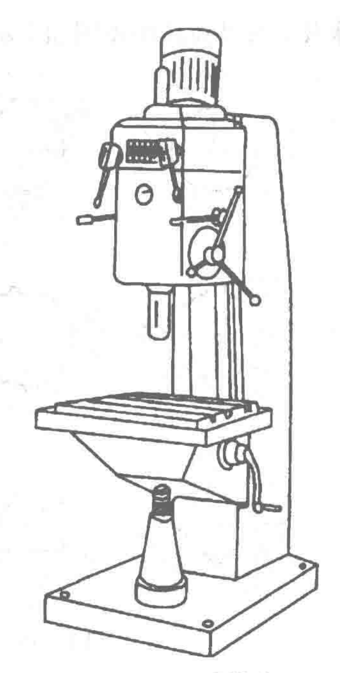


图 4-14　立式钻床

3. 摇臂钻床

摇臂钻床适用于单件和成批生产中大而重、移动不便、找正困难，不便于在立式钻床上加工的工件。图 4-15 所示为摇臂钻床。主轴箱 6 装在摇臂 5 上，可沿摇臂 5 的导轨移动，而摇臂 5 可绕内立柱 2 的轴线转动，因而可以方便地调整主轴 7 的位置，使主轴轴线与被加工孔的中心线重合。此外，摇臂 5 还可以沿立柱升降，以适应不同的加工需要。主轴的旋转运动及主轴套筒的轴向进给运动的开停、变速、换向、制动机构，都布置在主轴箱内。摇臂钻床的主轴箱、摇臂和立柱在主轴调整好位置后，必须用各自的夹紧机构将其可靠地夹紧，使机床形成一个刚性系统，以保证在切削力作用下机床有足够的刚度。

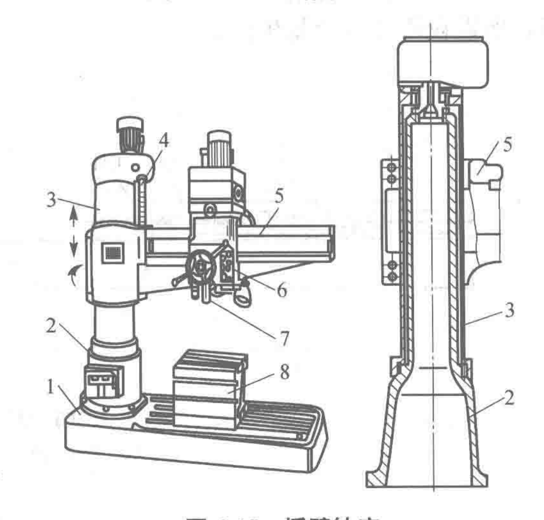


图 4-15　摇臂钻床

1—底座；2—内立柱；3—外立柱；4—摇臂升降丝杠；5—摇臂；6—主轴箱；7—主轴；8—工作台

4.4.2 拉床

拉床是用拉刀进行加工的机床，主要用来加工各种形状的通孔、平面及成形表面等。图 4-16 所示为适于拉削加工的一些典型表面形状。

拉孔的主运动是拉刀的移动，而进给运动是靠拉刀刀齿的齿升量来完成，所以拉床不需要进给运动，拉刀一次走刀即可完成粗、精加工。拉削时，拉刀及拉床上受的力很大，为了使运动平稳、易于操纵，拉床的主运动通常都是由液压驱动的。图 4-17（a）（b）所示分别

为卧式内拉床及立式外拉床的拉削加工示意图。

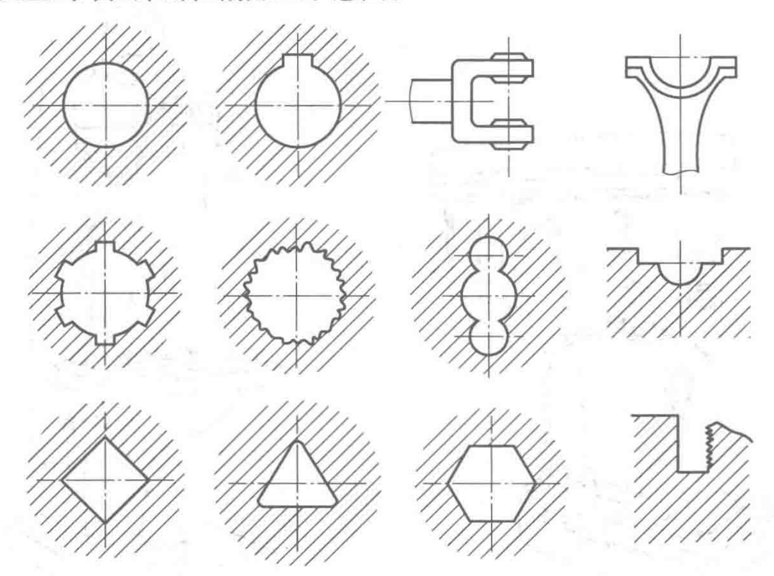


图 4-16　适于拉削的典型表面

拉床的生产率很高，且加工精度和表面质量也较好，但刀具结构复杂，设计、制造费用高，所以仅用于大批量生产。

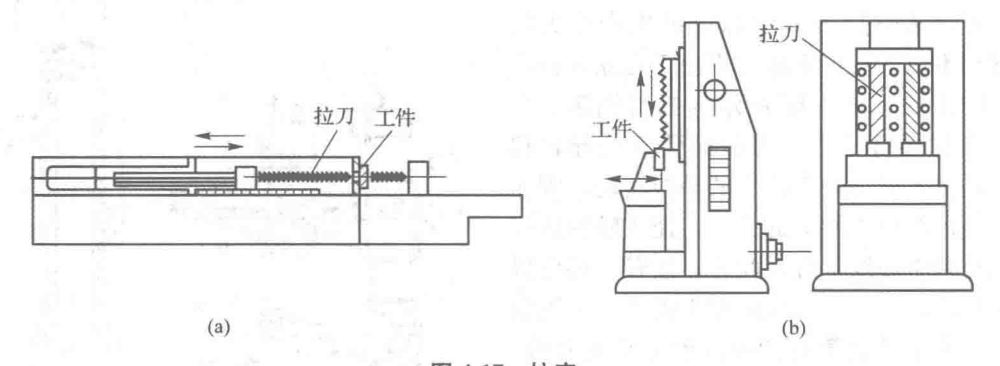


图 4-17　拉床

(a) 卧式拉床；(b) 立式拉床

4.5　套类零件孔加工刀具

4.5.1　钻头

孔加工刀具是应用得十分广泛的工具之一，按其用途可分为两类：一类是用于在实体材料上加工出孔的刀具，如麻花钻、中心钻、深孔钻等；另一类是对已有孔进行再加工的刀具，如扩孔钻、锪钻、镗刀、铰刀、内拉刀等。

1. 麻花钻

麻花钻是钻削中最常用的刀具，它是一种形状复杂的双刃钻孔或扩孔的标准刀具，一般用于孔的粗加工，也可用于攻螺纹、铰孔、拉孔、镗孔、磨孔的预制孔加工。

麻花钻由柄部、颈部和工作部分三个部分组成，如图 4-18 所示。

（1）工作部分

工作部分是钻头的主要部分，前端为切削部分，承担主要的切削工作，切削部分可看成是由两把镗刀所组成，它有两个前刀面、两个后刀面、两个副后刀面、两个主切削刃、两个副切削刃和一个横刃，如图 4-18（c）所示。后端为导向部分，起引导钻头的作用，也是切削部分的后备部分。钻头的工作部分有两条对称的螺旋槽，是容屑和排屑的通道。导向部分有两条棱边即刃带。

（2）柄部

柄部是钻头的夹持部分，用于与机床的连接，并用来传递扭矩。按麻花钻直径的大小分为直柄（小直径）和锥柄（大直径）两种，直径 13mm 以下的小直径钻头多用直柄，12mm 以上大直径钻头用莫氏锥柄。

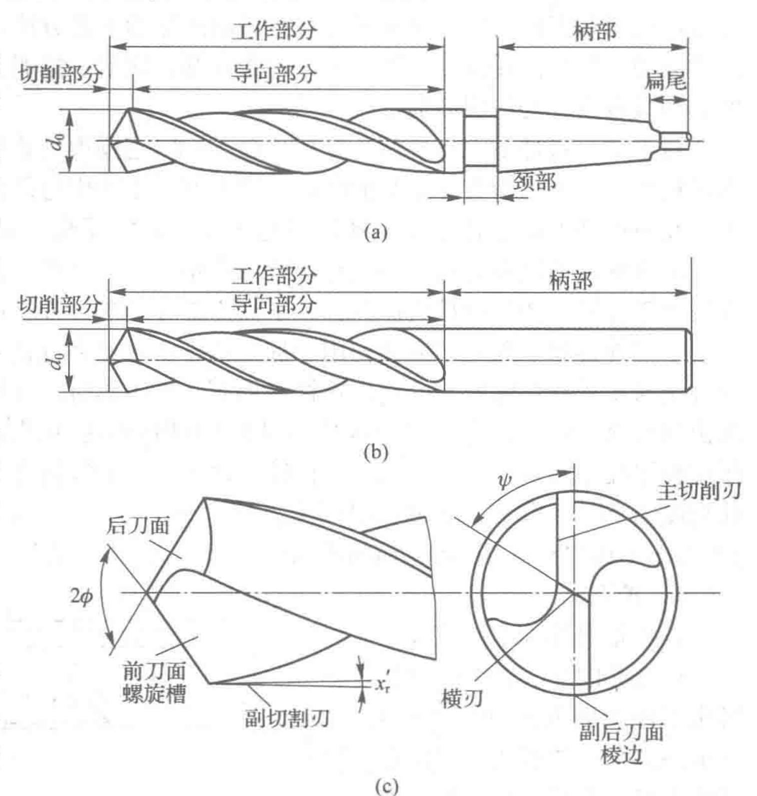


图 4-18　麻花钻

(a) 锥柄麻花钻的组成部分；(b) 直柄麻花钻的组成部分；(c) 麻花钻切削部分

（3）颈部。颈部是工作部分和柄部间的过渡部分，供磨削时砂轮退刀和打印标记用。为制造方便，直柄麻花钻一般不制有颈部，如图 4-18（b）所示。

2. 中心钻

中心钻是用来加工各种轴类零件两端的中心孔，主要有无护锥中心钻及带护锥中心钻两种，如图 4-19 所示。

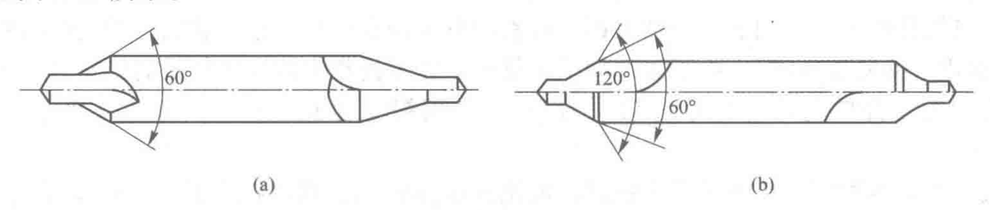


图 4-19　中心钻

(a) 无护锥中心钻；(b) 带护锥中心钻

3. 深孔钻

深孔钻一般是用来加工深度与直径之比大于 10 的孔。由于切削条件很差，对深孔钻有特殊要求：①断屑要好，排屑要通畅。同时还要有平滑的排屑通道，借助一定压力的切削液的作用促使切屑强制排出。②良好的导向，防止钻头偏斜。除钻头本身需要有良好的导向装置外，还采取工件回转、钻头只作直线进给运动的工艺方法，来减少钻时钻头的偏斜。③充分的冷却。切削液在深孔加工时同时起着冷却、润滑、排屑、减振与消声等作用，因此深孔钻必须具有良好的切削液通道。

对于加工直径不大且孔深与孔径比在 5～20 范围内的普通深孔，可采用普通加长高速钢麻花钻加工，采用带有冷却孔的麻花钻则更好。生产中还使用大螺旋角加长的麻花钻，该钻头可在铸铁件上加工孔深与孔径比不超过30～40的深孔。但是，如按照上述对深孔钻的要求，加长麻花钻及螺旋钻都不是理想的深孔钻。目前已被广泛采用的新型深孔钻孔有单刃外排屑小深孔钻和错齿内排屑深孔钻，下面主要介绍单刃外排屑小深孔钻。

单刃外排屑小深孔钻因最初用于加工枪管，故又名枪钻。枪钻工作部分采用高速钢或硬质合金与用无缝钢管压制成形的钻杆对焊而成。工作时工件旋转，钻头进给，同时高压切削液由钻杆尾部注入，冷却切削区后沿钻杆凹槽将切屑冲刷出来向外排屑，如图 4-20 所示。用这种深孔钻解决 $d=2\sim20\text{mm}$、长径比达 100 的中等精度小深孔加工甚为有效。加工出的孔精度为 IT8～IT10，表面粗糙度 R_a 为 3.2～0.8μm。常选用的切削用量为 $v=40\text{m/min}$，$f=0.01\sim0.02\text{mm/r}$，乳化切削液以压力为 6.3MPa，流量为 20L/min 注入。

4. 扩孔钻

扩孔钻是用来扩大毛坯孔径，提高孔的加工精度的刀具，可用于铰或磨前的预加工或孔的最终加工。与麻花钻相比较，其特点是没有横刃且齿数较多，导向性好，切削过程平稳且扩孔钻的强度和刚度较好，工作时可选择较大的切削用量。因此，扩孔钻的加工质量及生产率均比用麻花钻扩孔时高。扩孔钻的结构形式有高速钢整体式、镶齿套式及硬质合金可转位式，如图4-21所示。用扩孔钻加工达到的公差等级为 IT10 ～IT11，表面粗糙度 R_a 为 6.3～3.2μm。

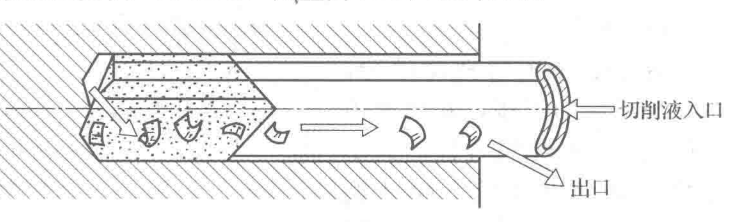


图 4-20　枪钻工作原理

5. 铰刀

铰刀用于中小直径孔的精加工或半精加工。铰削与钻孔、扩孔一样，只要工件与刀具之间有相对的旋转运动和轴向进给运动，就可进行铰削加工。因此，车床、钻床、镗床和铣床都可完成铰孔作业。铰削适合于加工钢、铸铁和有色金属材料，但不能加工硬度过高的材料(如淬火钢、冷硬铸铁等)。由于铰削加工余量小，铰刀齿数多以及有较长的修光刃，加工精度及表面质量都较高，精度可达 IT6～IT11，表面粗糙度 R_a 为 1.6～0.4μm 得到了广泛应用。

铰刀的基本类型有整体式手用铰刀、可调式手用铰刀、直柄机用铰刀、锥柄机用铰刀、硬质合金机用铰刀、套式机用铰刀、直柄莫氏圆锥铰刀和手用 1∶50 锥度销子铰刀等，如图 4-22 所示。

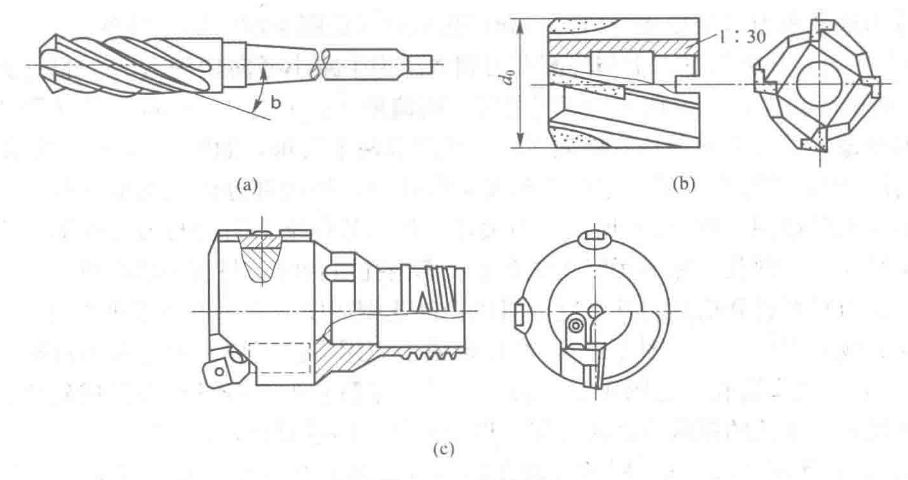


图 4-21　扩孔钻

(a) 高速钢整体式；(b) 镶齿套式；(c) 硬质合金可转位式

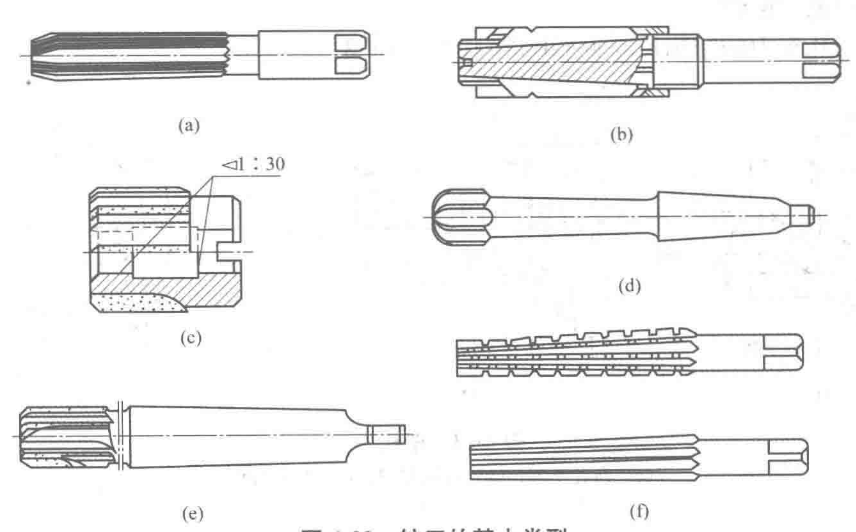


图 4-22　铰刀的基本类型

(a) 锥柄机用铰刀；(b) 套式机用铰刀；(c) 整体式手用铰刀；
(d) 可调式手用铰刀；(e) 硬质合金机用铰刀；(f) 直柄莫氏圆锥铰刀

6. 锪钻

锪钻用于加工各种圆柱形沉头孔、锥形沉头孔或凸台面等，如图 4-23 所示。锪钻可采用高速钢整体结构或硬质合金镶齿结构。

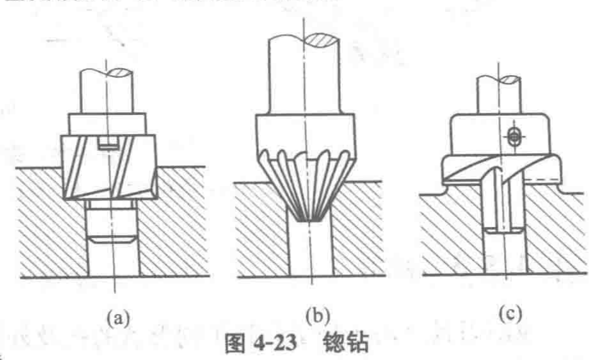


图 4-23　锪钻

(a) 带导柱平底锪钻；(b) 90 白抖蕊磷、90°锥度锪钻；
(c) 端面锪钻

4.5.2　内孔车刀

铸造孔、锻造孔、型材孔或用钻头钻出的孔，为了达到所要求的精度和表面粗糙度，还需要车孔。根据不同的加工情况，内

孔车刀可分为通孔车刀（见图 4-24（a））和盲孔车刀（见图 4-24（b））两种。

1）通孔车刀。其形状基本上与外圆车刀相似。为了减小径向切削力 F_y，防止振动，主偏角（κ_r）应取得较大，一般在 60°～75°之间，副偏角（κ_r'）为 15°～30°。为了防止内孔车刀和孔壁的摩擦，而又不使后角磨得太大，一般磨成两个后角，如图 4-24（c）所示。

2）盲孔车刀。盲孔车刀是用来车盲孔或阶台孔的，切削部分的几何形状基本上与偏刀相似。它的主偏角如图 4-24（b）所示。刀尖在刀杆的最前端，刀尖与刀杆外端的距离 a 应小于内孔半径 R，否则孔的底平面就无法车平。车内孔阶台时，只要不碰即可。

为了节省刀具材料和增加刀杆强度，可以把高速钢或硬质合金做成很小的刀头，装在碳钢或合金钢制成的刀杆上（见图 4-25），在顶端或上面用螺钉紧固。内孔车刀杆有车通孔的（见图 4-25（a））和车盲孔（见图 4-25（b））两种。车盲孔的刀杆方孔应做成斜的。内孔车刀杆根据孔径大小及孔的深浅可做成几组，以便在加工时选择使用。

图 4-25（a）和图 4-25（b）所示的内孔车刀杆，其刀杆伸出长度固定，不能适应各种不同孔深的工件。图 4-25（c）所示的方形长刀杆可根据不同的孔深调整刀杆伸出长度，以利发挥刀杆的最大刚性。

可转位内孔车刀的结构尺寸见 GB/T14297—1993。

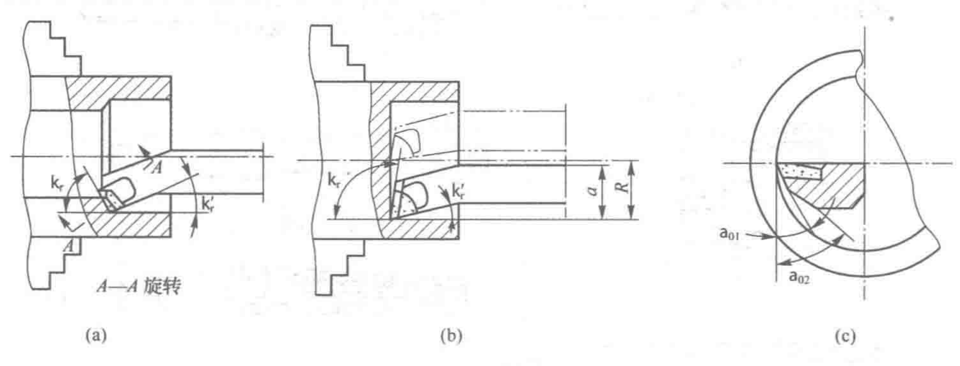


图 4-24　车孔刀

（a）通孔车刀；（b）盲孔车刀；（c）两个后角

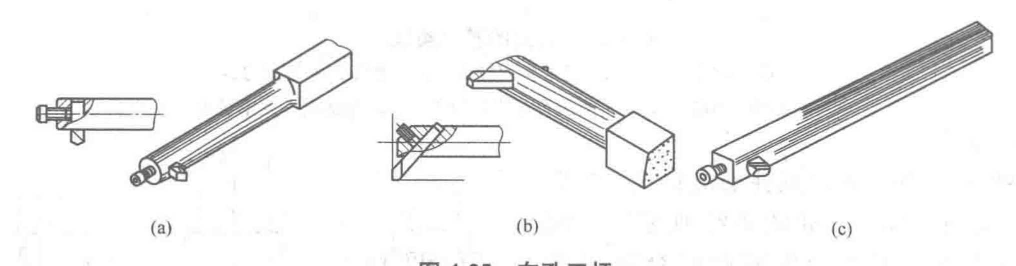


图 4-25　车孔刀杆

（a）通孔刀杆；（b）盲孔刀杆；（c）方孔刀杆

4.5.3　拉刀

拉削刀具是用于加工各种不同形状的孔及外表面的金属切削加工多刃刀具。工件表面通过拉削一次行程可完成粗、精加工，生产率极高，且由于拉削速度低、拉削过程平稳和切削层厚度小，因此加工精度可达 H7 级，表面粗糙度可达 $R_a0.8\mu m$。

孔的拉削刀具可分为拉刀（见图 4-26（a））和推刀（见图 4-26（b））两类。拉刀在拉床（卧式及立式）上使用，推刀则在压床上使用。拉刀的各部分名称如图 4-27 所示。拉刀齿部名称如图 4-28 所示。

拉刀及推刀的基本类型见 GB/T14329—1993，JB/T5613—1991，JB/T6357—1992 等标准。

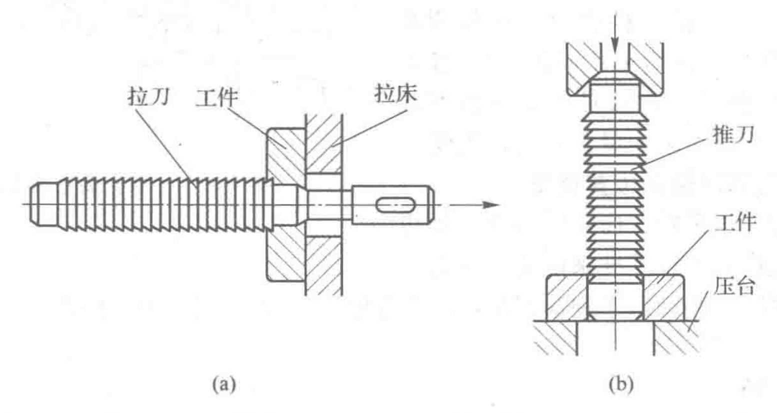


图 4-26　拉刀与推刀的工作图

（a）拉刀；（b）推刀

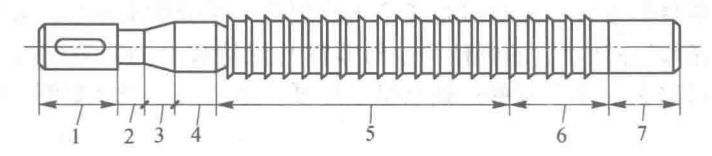


图 4-27　拉刀的各部分名称

1—柄部；2—颈部；3—过渡锥；4—引导部分；5—切削部分；6—校准部分；7—后引导部分

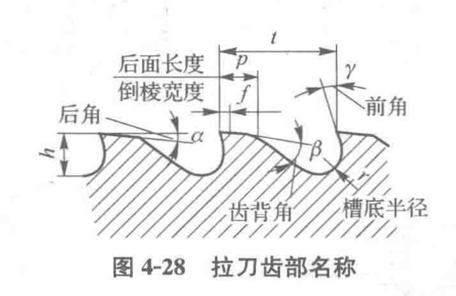


图 4-28　拉刀齿部名称

4.6　套类零件的装夹

4.6.1　套类零件保证同轴度和垂直度的装夹方法

套类工件主要的加工表面是孔、外圆和端面。内孔一般用钻孔、车孔，或钻孔、铰孔来达到尺寸精度和表面粗糙度要求。孔达到以上技术要求后，套类加工的关键问题是如何达到图样所规定的各项形位公差要求。下面将介绍保证同轴度和垂直度的方法。

1. 在一次安装中完成

在单件生产时，可以在一次安装中把工件全部或大部分加工完毕。这种方法没有定位误差。如果车床精度较高，可获得较高的形位精度。但是，采用这种方法车削时需要经常转换刀架，如图 4-29 所示的工件轮流使用外圆车刀、45°车刀、钻头（包括车孔或扩孔）、铰刀和切断刀等刀具加工。如果刀架定位精度较差，尺寸较难掌握，切削用量也要时常改变。

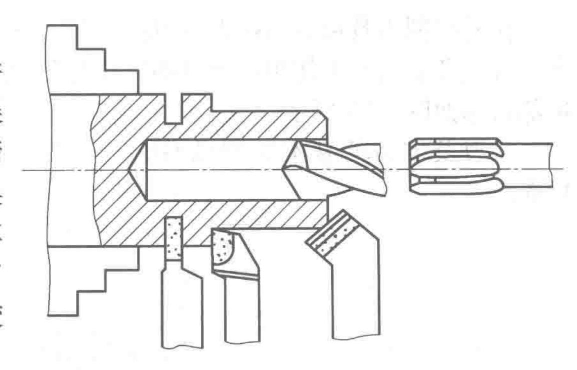


图 4-29　一次安装中加工工件

2. 以内孔为基准保证位置精度

中、小型的套、带轮、齿轮等零件一般可用心轴，以内孔作为定位基准来保证工件的同轴度和垂直度。心轴由于制造容易，使用方便，因此在工厂牛应用很广泛。常用的心轴有下列几种。

（1）实体心轴

实体心轴有不带阶台的实体心轴和带阶台的实体心轴两种。不带阶台的实体心轴有 1∶1 000～1∶5 000 的锥度，又称小锥度心轴，如图 4-30（a）所示。这种心轴的优点是制造容易，加工出的零件精度较高；缺点是长度无法定位，承受切削力小，装卸不太方便。图 4-30（b）所示是台阶式心轴，它的圆柱部分与零件孔保持较小的间隙配合，工件靠螺母来压紧。优点是一次可以装夹多个零件；缺点是精度低。如果装上快换垫圈，装卸工件将非常方便。

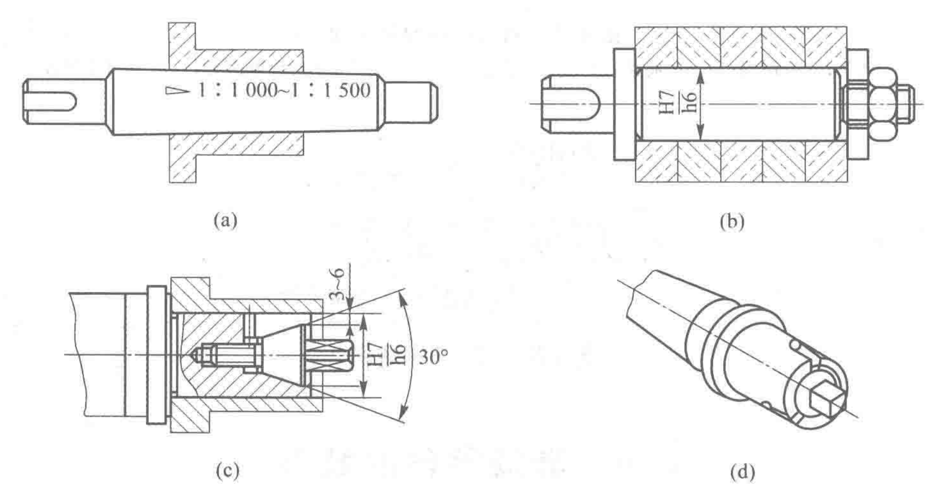


图 4-30　各种常用心轴

（a）小锥度心轴；（b）台阶式心轴；（c）胀力心轴；（d）槽做成三等分

（2）胀力心轴

胀力心轴依靠材料弹性变形所产生的胀力来固定工件，由于装卸方便，精度较高，工厂中使用非常广泛。

可装在机床主轴孔中的胀力心轴如图 4-30（c）所示。根据经验，胀力心轴塞的锥角最

好为30°左右，最薄部分壁厚3～6mm。为了使胀力保持均匀，槽可做成二等分，如图4-30(d)所示。临时使用的胀力心轴可用铸铁做成，长期使用的胀力心轴可用弹簧钢（如65Mn）制成。这种心轴使用最方便，因此得到广泛采用。

以上方法是一种以工件内孔为基准来达到相互位置精度的方法，其优点是：设计制造简单，装卸方便，比较容易达到技术要求。但是，当加工外圆很大、内孔很小、定位长度较短的工件时，应该采用外圆为基准来保证技术要求。

3. 用外圆为基准保证位置精度

工件以外圆为基准保证位置精度时，车床上一般应用软卡爪装夹工件。

软卡爪是用未经淬火的钢料（如45钢）制成的。首先，这种卡爪在本身车床上车成所需要的形状，因此，可确保装夹精度。其次，当装夹已加工表面或软金属工件时，不易夹伤工件表面。另外，还可根据工件的特殊形状，相应的车制软卡爪，以装夹工件。软卡爪在企业中已得到越来越广泛的应用。

4.6.2 钻床夹具

1. 钻床夹具的分类及结构特点

钻床夹具又称钻模，主要用来保证所加工孔的位置精度。

按钻模的结构特点分，有固定式、翻转式、回转式、盖板式、滑柱式和移动式等几种主要类型。

(1) 固定式钻模

如图4-31所示为固定式钻模，其在使用过程中，夹具与工件在机床上的位置固定不变，此类夹具的刚性较好，钻孔位置精度较高，常用于立式钻床，摇臂钻床和多轴钻床上。

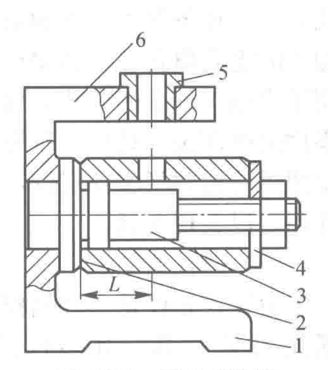


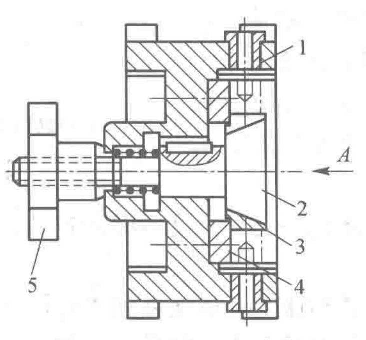
图4-31　固定式钻模

1—夹具体；2—工件；3—心轴；4—垫圈；5—钻套；6—钻模板；

(2) 翻转式钻模

翻转式钻模是一种活动式钻模，工件一次性安装在夹具中后，借助夹具使用过程中的受动翻转来加工不同方向上的孔。由于工件在加工中翻来翻去，所以要求工件与钻模的总重量不能太重。

如图4-32所示的翻转式钻模，工件以内孔和端面定位，锁紧螺母5，向左边拉紧倒锥螺栓2，使可胀圈胀开与内孔紧贴，并使工件端面靠紧在支承板4上。根据被加工零件孔的位置在夹具上装有钻套1用以引导钻头。夹具整体在钻床上翻转依次钻削4个圆孔。加工完毕后，松开螺母5，在弹簧的作用下，倒锥螺母2右移，松开胀圈3更换工件。这种夹具在加工小于$\phi6$的孔时，因



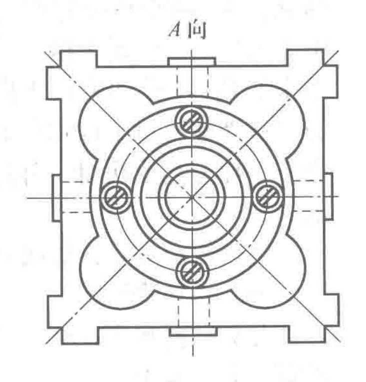


图4-32　翻转式钻模

1—钻套；2—倒锥螺栓；3—胀圈；4—支承板；5—夹紧螺母

为切削力比较小，所以钻模在钻床上不需要压紧，直接用手扶持，非常方便。用于 ϕ6 的孔时，则应用螺钉压板将钻模固定。

(3) 回转式钻模

如图 4-33 所示为一回转式钻模，用来依次加工工件上同一截面上均匀分布的 6 个径向孔。工件安装在可回转分度的心轴 3 上，由开口垫片和螺母 7 锁紧。每加工好一个孔就松开螺母 7，拔出对定销 5，然后分度盘 4 就可以转位，转位后，将对定销插好，再螺母夹紧后即可进行下一个工位上的孔加工。此类夹具主要用于中、小批量生产中，对分布于同一圆周上的多个等直径轴向孔或者同一截面上的多个等直径的径向孔的加工。

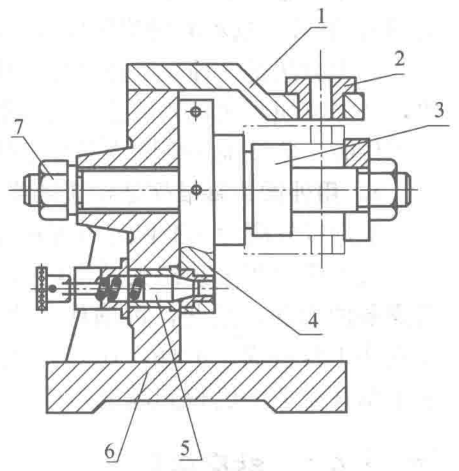


图 4-33　回转式钻模

1—钻模板；2—钻套；3—心轴；4—分度盘；5—对定销；6—夹具体；7—锁紧螺母

(4) 盖板式钻模

此类夹具的特点是没有夹具体，钻模上除了安装钻套外，还设置了工件的定位元件与夹紧机构，工件加工时把它覆盖在上面即可。此类夹具结构简单，多用于大型工件上的小孔的加工。如图 4-34 所示为箱体零件的端面法兰孔加工所用的盖板式钻模，以箱体的孔及端面为定位基准，其如盖子一样置于图示位置并且实现定位，当滚花螺钉旋进时压迫钢球使径向分布的三个滑柱 5 顶向工件内孔面，以实现夹紧。

(5) 滑柱式钻模

滑柱式钻模是一种钻模板可以升降的通用可调夹具，其结构已标准化与规格化。

如图 4-35 所示手动滑动式钻模，用以钻、扩、铰工件上的 ϕ20H7 孔。工件以外圆端面、底面及后侧面分布放在定位圆锥孔 9、两个可调定位支承钉 2 及圆柱销 3 上定位。转动手柄通过传动机构（图中未示出），使钻模板下降，两个压柱 4 通过液性塑料对工件均匀夹紧。由快换钻套 7 引导刀具依次对工件进行钻、扩、铰加工。

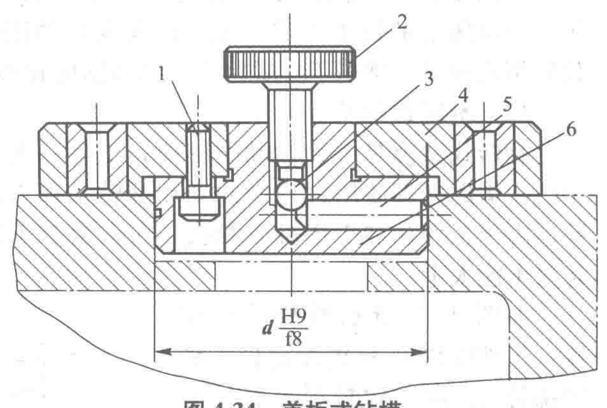


图 4-34　盖板式钻模

1—螺钉；2—滚花螺钉；3—钢球；4—钻模板；5—滑柱；6—定位销

钻模板在夹紧工件或升降到一定的高度后必须自锁，以保证加工与安全。

(6) 移动式钻模

此类钻模常用在单轴立式钻床上，依次钻削工件同一表面的多个孔。所加工的工件与孔径都不大，属于小型夹具。移动的形式有两种：一种是自由移动；另外一种是需要专门设计的导轨和定程机构来控制移动方向与距离。如图 4-36 为一种移动式钻模。夹具体在左右挡板间移动，当移到右挡板 1 时钻削孔 1；当移到右挡板 2 时钻削孔 2，这样可以缩短钻头对

准钻套的辅助时间，同时导轨还可以承受一定的扭矩。

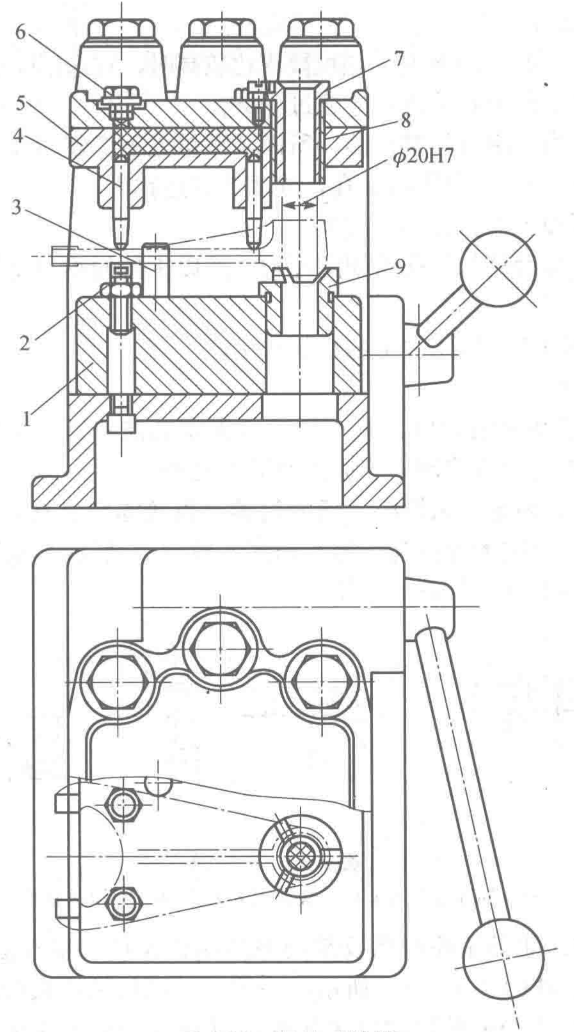


图 4-35　滑柱式钻模

1—夹具体；2—可调定位支承钉；3—圆柱销；4—压柱；5—钻模板；6—螺母；7—快换钻套；8—衬套；9—定位圆锥孔

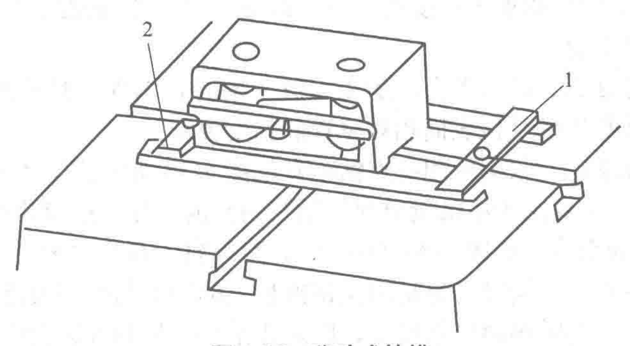


图 4-36　移动式钻模

1—右端挡板；2—左端挡板

2. 钻模设计要点

(1) 钻模类型的选择

1) 当被钻削孔大于 ϕ10mm 或加工精度要求比较高时，宜选用固定式钻模。

2) 翻转式钻模和工件的总重量不应超过 10kg。

3) 盖板式钻模因为使用时经常搬动，所以其重量也不应超过 10kg，为减轻重量，可以设置加强筋而减小模板厚度，设置减轻孔，或改为铸造铝件。

4) 移动式钻模所加工的孔径不宜过大。

5) 滑柱式钻模因为滑柱与导孔为间隙配合，所以工件的垂直度与孔位置度要求比较高，不宜采用。

6) 盖板式钻模多用于大型工件上的小孔加工。

(2) 钻模板的设计

钻模板是用来安装钻套的元件，有时还兼有夹紧功能，所以它应该有一定的强度与刚度，其位置一般在工件的上方或前方。通常有以下几种。

1) 固定式钻模板。固定式钻模板一般采用螺销直接固定在夹具体上，对于简单的结构也可以与夹具体制成一体或者焊接为一体。如图 4-37 (a) 所示，此类钻模板的钻孔精度高，故而使用广泛，但有时装卸工件较不方便。

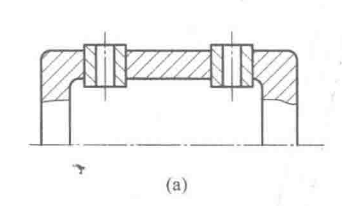
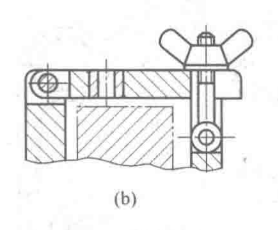
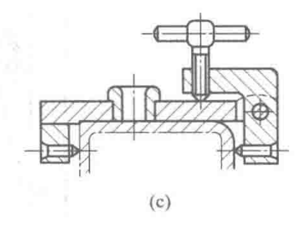

(a)

(b)

(c)

图 4-37 钻模板

(a) 固定式钻模板；(b) 快换式钻模板；(c) 可卸式钻模板

2) 铰链式钻模板。此类钻模板用铰链与夹具体相连接，钻模板可绕铰链轴旋转翻起，因而使工件装卸方便。如图 4-37 (b) 所示，一般铰链销与钻模板配合为 G7/h6，与铰链座槽的配合为 H8/j7 钻模板与夹具底面的平行度可以通过调整垫片来保证。由于各运动环节存在间隙，因而这种钻模板的工作精度较固定式钻模板低。

3) 可卸式钻模板。当装夹工件需要将钻模板卸掉时，则须采用可卸式钻模板，如图 4-37 (c) 所示，此类钻模板的加工精度也较高，但是装卸工件的辅助时间长，因而效率较低。

(3) 钻套的设计要点

钻套是用来引导钻头、铰刀等孔用加工刀具，同时，增强刀具的刚度，根据使用特点，钻套并保证所加工孔与工件其他表面相对位置的精度要求。

常用的钻套已标准化，根据使用特点钻套有如图 4-38 所示的几种形式。

1) 固定式钻套。主要用于小批量单纯用钻头钻孔的工序。固定式钻套有两种结构形式，如图 4-38 (a) 所示为无肩，如图 4-38 (b) 所示为有肩。有肩主要用于钻模板较薄时，以保证钻套必须的导引长度，同时，也是防止钻模板上的切屑与冷却液落入钻套孔中而影响加工质量。安装时钻套下端需稍超出钻模板，以防止带状切屑卷入钻套中而加剧钻套的磨损。

2) 可换式钻套。可换式钻套可解决在大批量生产中，固定钻套磨损后无法更换的缺点，

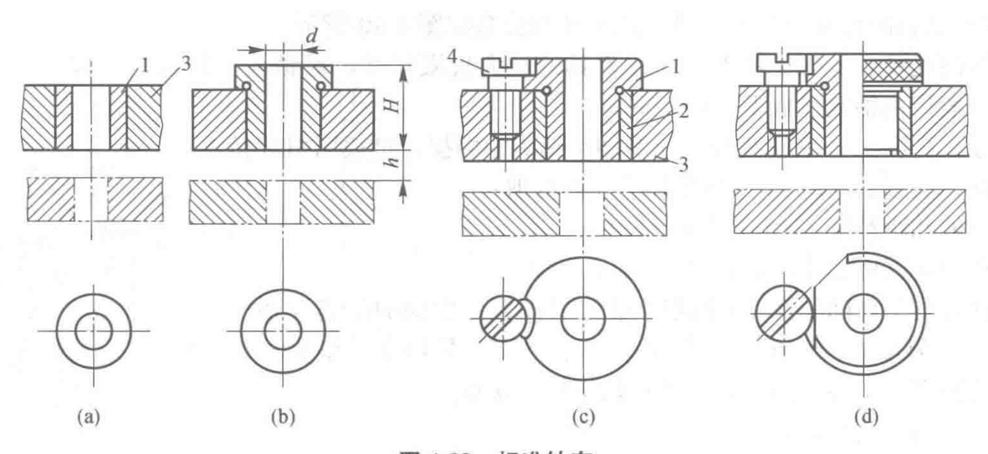


图 4-38　标准钻套

1—钻套；2—衬套；3—钻模板；4—螺钉

如图 4-38（c）所示钻套 1 上铣有台肩，螺钉 4 的圆柱头压在此台肩上，可以防止钻套转动与掉出，更换钻套时只要把螺钉拧去即可。对需要频繁更换的钻套，应在钻套外装衬套 2，以保护钻模板不被损坏。

3）快换式钻套。当被加工的孔需要依次钻、扩、铰或攻丝时，为适应刀具尺寸的变化，需要采用不同孔径的钻套，或者去掉钻套直接加工，这样就要在一个工序中不断更换钻套，这时应该使用快换式钻套。如图 4-38（d）所示，快换式钻套与可换式钻套不同点在于凸缘上加工出缺口，更换时不必拧出螺钉，只要把缺口转到对着螺钉的位置，即可迅速更换钻套。

4）特殊钻套。因为工件的特殊形状，或被加工孔位置的特殊性，不宜采用标准钻套，则需要自行设计结构特殊的钻套。图 4-39 为几种特殊钻套的形式。图 4-39（a）所示为钻斜面上的孔或钻斜孔用的钻套；图 4-39（b）所示为钻凹坑中的孔或者工件钻孔端面与钻模板相距较远用的钻套。以上两种钻套都是为了保证钻头具有良好的起钻条件与钻套应用的引导长度。如采用标准钻套，就会造成钻头折断或者钻孔引偏。当两孔孔距很小，无法采用各自的钻套时，而应采用图 4-39（c）所示为的钻套，它在同一个钻套上加工出两个导向孔。

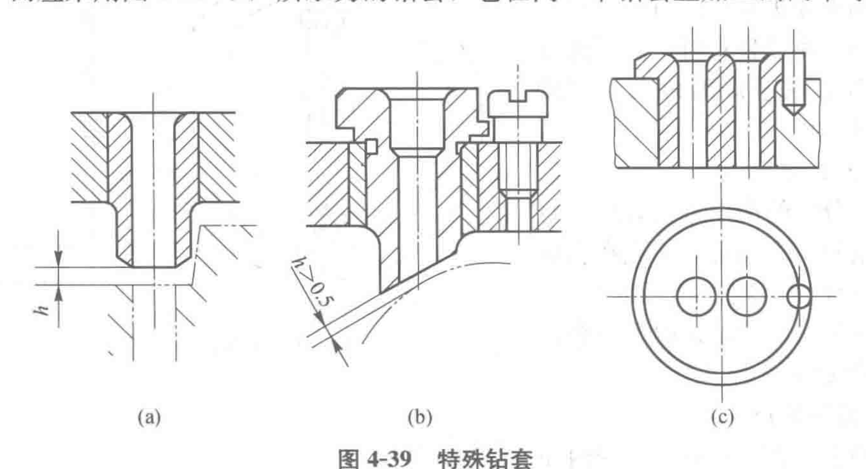


图 4-39　特殊钻套

5）钻套的尺寸与公差。钻套的尺寸与公差如图 4-40 所示。

导向孔径 d：钻套基本尺寸取刀具的最大极限尺寸，对钻头、扩孔钻、铰刀等定值刀具，一般按基轴制选取 F7 或者 G6。

钻套高度 H：钻套高度过长易加剧钻头的磨损，过短则引导精度下降，故钻套高度 H 一般按以下原则选取：

一般孔距精度 $H=(1.5\sim2)d$；

孔距精度要求高时，$H=(2.5\sim3.5)d$。

钻套与工件间距离 h：钻套下端与工件表面之间的距离 h 用于排屑。H 值过大会降低引导作用，过小时切屑易堵塞、钻头易折断。故钻套与工件间距离 h 一般按以下原则选取：

加工铸铁类时，$h=(0.3\sim0.7)d$；

加工钢件类时，$h=(0.7\sim1.5)d$；

工件精度要求高时，$h=0$，使切屑全部从钻套中排出。

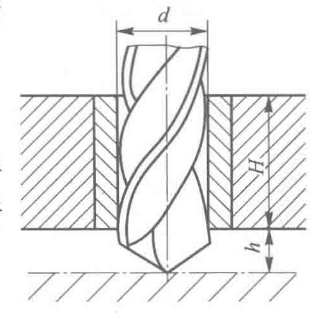


图 4-40　钻套尺寸

4.7　套类零件的测量

4.7.1　孔径的测量

孔的尺寸精度要求较低时，可采用内卡钳或游标卡尺；精度高时，可采用以下几种方法。

1. 内卡钳

在孔口试切削或位置狭小时，使用内卡钳显得灵活方便。内卡钳与外径千分尺配合使用，也能测量出较高精度（IT7～IT8）的孔径。

2. 塞规

用塞规检验孔径时，当过端进入孔内而止端不能进入孔内时，说明工件孔径合格。测量盲孔时，为了排除孔内的空气，在塞规的外圆上（轴向）开有排气槽。

3. 内径百分尺

内径百分尺的使用方法如图 4-41 所示。测量时，内径百分尺应在孔内摆动，在直径方向应找出最大尺寸，轴向应找出最小尺寸，这两个重合尺寸就是孔的实际尺寸。

图 4-41　内径百分尺的使用方法

4. 内径千分尺

当孔径小于 25mm 时，可用内径千分尺测量。内径千分尺测量及其使用方法如图 4-42 所示。这种千分尺刻线方向与外径千

分尺相反，当微分筒顺时针旋转时，活动爪向右移动，量值增大。

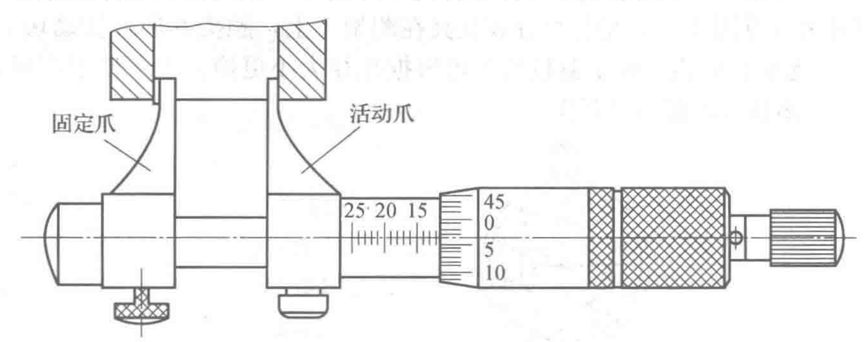


图 4-42 内径千分尺的使用方法

4.7.2 形状和位置精度的测量

1. 形状和位置精度的测量仪器

(1) 百分表

工件的形状和位置精度一般用百分表（或千分表）来测量。百分表是一种指示式量仪，其刻度值为 0.01mm。刻度值为 0.001mm 或 0.002mm 的为千分表。

常用的百分表有钟表式和杠杆式两种，如图 4-43 所示。

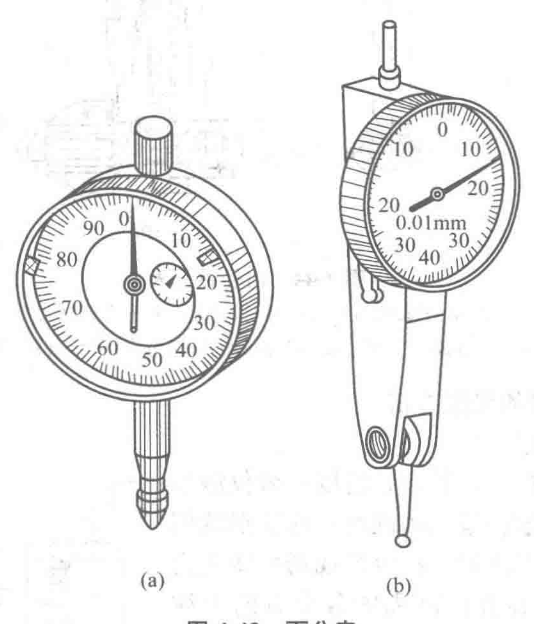


图 4-43 百分表

(a) 钟表式；(b) 杠杆式

钟表式百分表的工作原理是将测杆的直线移动，经过齿条齿轮传动放大，转变为指针的转动，表面上一格的刻度值为 0.01mm。

杠杆式百分表是利用杠杆齿轮放大原理制成的。由于杠杆式百分表的球面测杆，可以根据测量需要改变位置，因此使用灵活方便。

(2) 内径百分表（或千分表）

内径百分表（见图 4-44）是将百分表装夹在测架 1 上，触头 6 通过摆动块 7、杆 3，将测量值 1∶1 传递给百分表。固定测量头 5 可根据孔径大小更换。为了便于测量，测量头旁装有定心器 4。测量力由弹簧 2 产生。

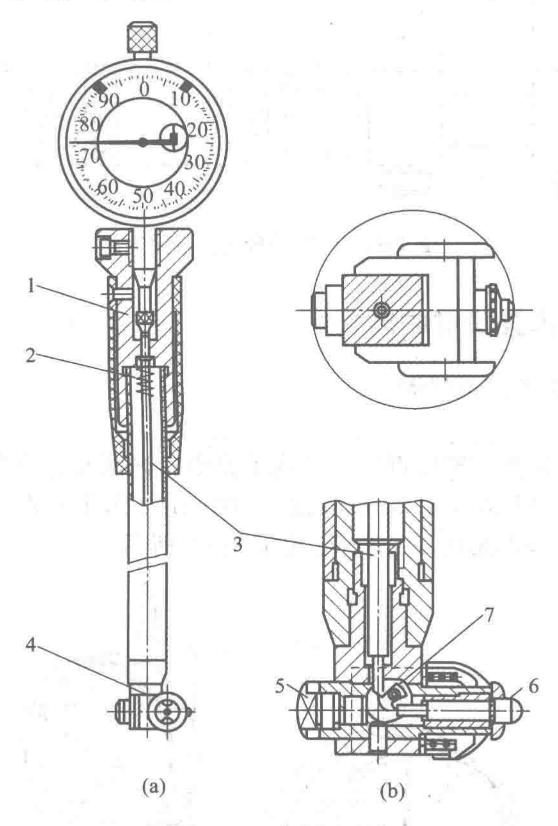


图 4-44　内径百分表

(a) 结构原理；(b) 孔中测量情况（测量头部放大图）

1—测架；2—弹簧；3—杆；4—定心器；5—测量头；6—触头；7—摆动块

2. 形状和位置精度的测量方法

(1) 形状精度的测量方法

在车床上加工的圆柱孔，其形状精度一般仅测量孔的圆度和圆柱度（一般测量孔的锥度）两项形状偏差。当孔的圆度要求不很高时，在生产现场可使用内径百分表（或千分表）在孔的圆周的各个方向上测量，测量结果的最大值与最小值之差的一半即为圆度误差。

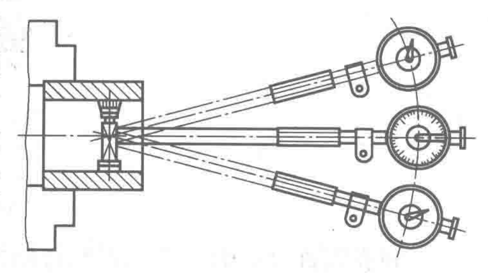


图 4-45　使用内径百分表的测量方法

使用内径百分表测量属于比较测量法。测量时，必须摆动内径百分表（见图 4-45），所得的最小尺寸就是孔的实际尺寸。在生产现场，测量孔的圆柱度时，只要在孔的全长上取前、后、中的几点，比较其测量值，其最大值与最小值之差的一半

即为全长上圆柱度误差。

内径百分表也可以测量孔的圆度。测量时，只要在孔径圆周上变换方向，比较其测量值即可。

内径百分表与外径千分尺或标准套规配合使用时，也可以比较出孔径的实际尺寸。

(2) 位置精度的测量方法

1) 径向圆跳动的测量方法。一般套类工件（见图 4-46（a））测量径向圆跳动时，都可以用内孔作基准，把工件套在精度很高的心轴上，用百分表（或千分表）来检验，如图 4-46（b）所示。百分表在工件转一周所得的读数差就是径向圆跳动误差。

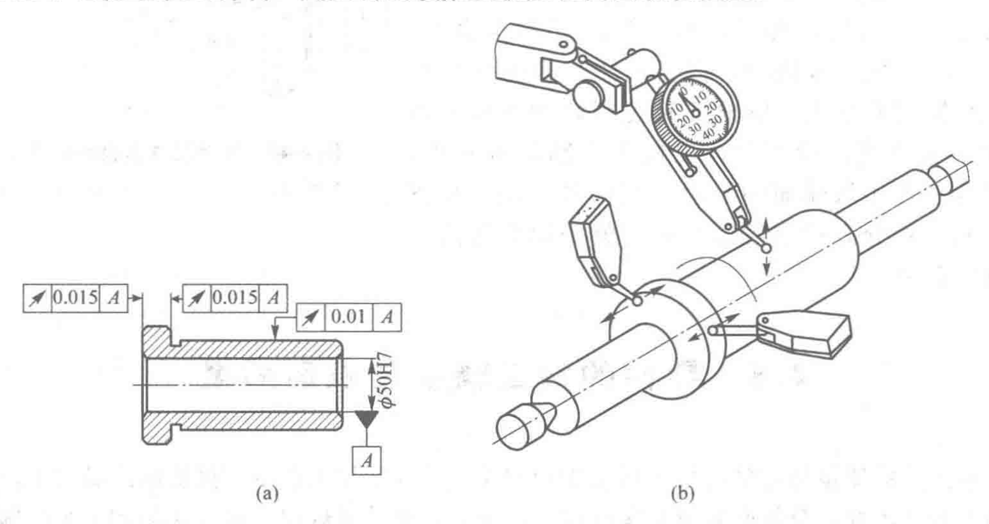


图 4-46　用百分表测量径向圆跳动的方法

(a) 工件；(b) 测量方法

对某些外形比较简单而内部形状比较复杂的套筒（见图 4-47（a）），不能安装在心轴上测量径向圆跳动时，可把工件放在 V 形块上（见图 4-47（b）），经向定位，以外圆为基准来检验。测量时，用杠杆式百分表的测杆插入孔内，使测杆圆头接触内孔表面，转动工件，观察百分表指针跳动情况。百分表在工件转一周所得的读数差就是工件的径向圆跳动误差。

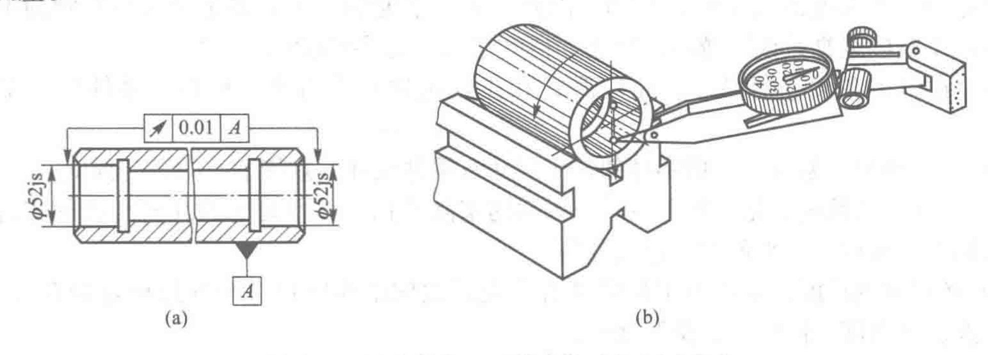


图 4-47　工件装在 V 形块上检验径向圆跳动

(a) 工件；(b) 测量方法

2）端面圆跳动的测量方法。套类工件端面圆跳动的测量方法如图 4-46（b）所示。先把工件装夹在精度很高的心轴上，利用心轴上极小的锥度使工件轴向定位，然后把杠杆式百分表的圆测头靠在所需要测量的端面上，转动心轴，测得百分表的读数差就是端面圆跳动误差。

3）端面对轴线垂直度的测量方法。测量端面垂直度，必须经过两个步骤。首先要测量端面圆跳动是否合格，如果符合要求，再测量端面的垂直度。当端面圆跳动检查合格后，再把工件 2 装夹在 V 形块 1 的小锥度心轴上，并放在精度很高的平板上检查端面的垂直度。检查时，先校正心轴的垂直度，然后用百分表 4 从端面的最里一点向外拉出，见图 4-48 所示。百分表指示的读数差，就是端面对内孔的垂直度误差。

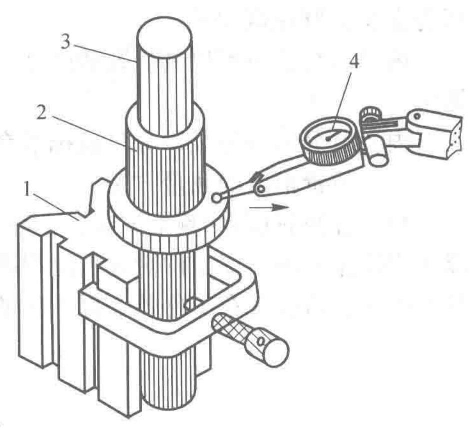


图 4-48　检验工件垂直度的方法

1—V 形块；2—工件；3—心轴；4—百分表

4.8　零件的加工精度与表面质量

机械产品的质量与零件的加工质量密切相关，零件的加工质量直接影响产品的工作性能和使用寿命。因此，分析研究影响零件加工质量的因素及其规律，采取相应的工艺措施，能对零件的加工质量产生重要影响。零件的加工质量主要包括加工精度和表面质量两方面。

4.8.1　机械加工精度

1. 机械加工精度概述

加工精度是指零件经过机械加工后，其尺寸、形状、表面相互位置等几何参数的实际值与理想值相符合的程度，而它们之间的偏离程度则称为加工误差。在实际生产中，加工精度的高低是用加工误差的大小来衡量的。因此，加工精度和加工误差是对同一问题的不同描述，即加工精度越高，误差越小；反之，精度越低，则误差越大。

零件的几何参数包括尺寸、几何形状和相互位置三个方面，所以，零件的加工精度包括：

1）尺寸精度。是指加工后零件的实际尺寸与零件尺寸公差带中心的符合程度。

2）几何形状精度。是指加工后零件表面的实际几何形状与理想的几何形状的相符合程度，如圆度、圆柱度、平面度、直线度等。

3）相互位置精度。是指加工后零件有关表面之间的实际位置与理想位置的符合程度，如平行度、垂直度、同轴度、位置度等。

零件的尺寸精度、形状精度和相互位置精度之间是相互联系的，通常形状误差应限制在位置公差内，位置误差应限制在尺寸公差内，一般尺寸精度高，其相应的形状和相互位置精度也高。

生产实践证明，由于加工中各种因素的影响，不管多么精密的加工方法，都不可能把零件加工得绝对准确；在相同条件下生产的同一批零件，其尺寸、形状和表面相互位置也不会完全一致，总会存在一定的加工误差。因此，在满足产品的工作要求的前提下，应允许有一定的加工误差存在，并在生产中采取合理的工艺方法，以提高零件加工的生产率和经济性。

2. 获得加工精度的方法

(1) 获得尺寸精度的方法

1) 试切法。通过试切、测量、调整、再试切，反复进行到被加工尺寸达到要求为止的加工方法。这种方法的生产效率较低，产品的加工精度在很大程度上取决于操作者的技术水平，主要适用于单件、小批生产。

2) 调整法。在一批零件加工前，根据零件规定的尺寸预先调整好刀具和工件在机床上的相对位置，并在加工过程中保持该位置不变，以保证被加工尺寸的加工方法。和试切法相比，调整法省去了重复多次的试切和测量工作，因而生产效率较高，广泛应用于各类半自动、自动机床和自动线上，适用于成批、大量生产。

3) 定尺寸刀具法。用刀具的相应尺寸来保证工件被加工部位尺寸的方法。例如，用钻头、铰刀、拉刀加工孔，用槽铣刀加工槽等，孔的直径和槽的宽度就是由刀具的尺寸来获得的。该方法的加工精度主要取决于刀具的制造、磨损和切削用量。其特点是操作简便，生产率较高，加工精度较稳定，但刀具制造较复杂，常用于孔、螺纹和成形表面的加工。

4) 自动控制法。在加工过程中，通过由测量装置、进给装置和切削机构以及控制系统等组成的自动控制加工系统，自动完成加工过程中的尺寸测量、刀具调整和切削加工等工作，从而获得所要求的尺寸精度的方法。该方法获得的加工精度主要取决于控制系统中各元件的灵敏度、系统的稳定性和机械装置的工作精度，适用于加工精度要求较高、形状较复杂的单件或中小批量生产。

(2) 获得形状精度的方法

1) 轨迹法。利用刀具切削刃与工件的相对运动轨迹来获得工件表面的形状及其精度的加工方法。轨迹法的加工精度与机床的精度关系密切。例如：用工件的回转运动和车刀的直线运动车削圆柱面和圆锥面；用刨刀的直线运动工件垂直于刀具直线运动方向的直线运动加工平面等。

2) 成形法。利用成形刀具刀刃的几何形状和成形运动来获得工件表面的形状及其精度的方法。成形法的加工精度主要取决于刀刃的形状精度和刀具的装夹精度。该方法可以简化机床结构，提高生产效率。例如：用成形车刀车成形面；用成形铣刀铣曲面。

3) 展成法。利用刀具与工件作展成切削运动，由刀刃的包络线形成工件形状的加工方法。展成法的形状精度主要与机床展成运动的传动精度和刀具精度有关，常用于各种齿形加工。

(3) 获得相互位置精度的方法

1) 一次装夹法。工件上几个相关加工表面（包括基准面）之间的位置精度是在同一次装夹中，由各有关刀具相对工件的成形运动之间的位置关系来保证的方法。因为一次装夹加工出的各表面间的位置精度不受定位、夹紧的影响，只与机床精度有关，所以位置精度较高。

2) 多次装夹法。由于加工表面的形状、位置和加工方法等原因的限制，工件上各个表

面的位置精度必须在几次装夹中才能获得的方法。工件定位基准面和装夹方式将对位置精度产生直接的影响。

3. 影响机械加工精度的因素

在机械加工时，由机床、夹具、刀具和工件等构成的系统称为工艺系统，工艺系统各环节中凡是能直接引起加工误差的因素都称为原始误差。在产品加工过程中，由于工艺系统中各种原始误差的存在，使得工件与刀具之间的正确几何关系遭到破坏而产生加工误差。为了保证和提高零件的加工精度，必须采取措施消除或减少原始误差对加工精度的影响，将加工误差控制在允许的变动范围（公差）内。

产生原始误差的因素很多，一部分与工艺系统本身的初始状态有关，是在加工前就存在的工艺系统本身的误差，包括加工原理误差，机床、夹具、刀具的制造误差，工件的装夹误差，工艺系统调整误差等，又称为工艺系统的静误差或几何误差；一部分与切削过程有关，是在加工工艺过程中工艺系统的受力变形、受热变形以及刀具磨损等引起的误差，又称为工艺系统的动误差或加工过程误差；还有一部分与加工后的情况有关，如残余应力和测量因素引起的误差。根据误差的性质，可将影响加工精度的原始误差进行如图 4-49 所示的归纳。

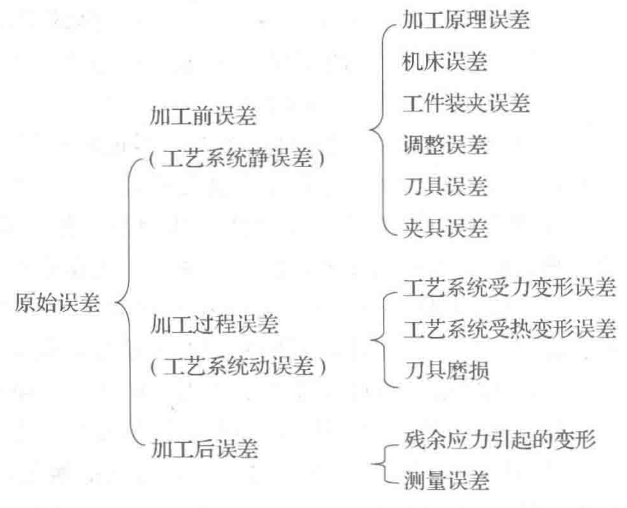


图 4-49 影响加工精度的原始误差

4.8.2 工艺系统的几何精度对加工精度的影响

1. 加工原理误差

加工原理误差是指由于采用了近似的成形运动或近似的刀刃轮廓进行加工而产生的误差，也称为理论误差。通常，为了获得规定的加工表面，刀具和工件之间必须实现准确的成形运动，机械加工中称为加工原理。理论上应采用理想的加工原理和完全准确的成形运动以获得精确的零件表面。如车削螺纹时，必须使刀具和工件间完成准确的螺旋运动（即成形运动）；滚切齿轮时，必须使滚刀和工件间有准确的展成运动。但在生产实践中，完全精确的加工原理往往很难实现，即使实现，也可能会导致机床或刀具的结构复杂，制造困难；或结构环节增加，造成机床传动中的误差增大；或使加工效率降低。因此，在这种情况下采用近似的加工原理是获得较高的加工精度和生产率，提高加工经济性有效工艺措施。

例如，齿轮滚齿加工用的滚刀就存在两种原理误差。首先，用滚刀切削渐开线齿轮时，滚刀应为一渐开线蜗杆，但实际上为了制造方便，采用阿基米德基本蜗杆或法向直廓基本蜗杆代替渐开线基本蜗杆；另外，由于滚刀刀刃数有限，实际加工出的齿形是一条由微小折线段组成的曲线，而不是理论上的光滑渐开线，所以滚切齿轮是一种近似的加工方法。

采用近似的成形运动或近似的刀刃轮廓，虽然会带来加工原理误差，但往往可以简化机

床结构或刀具形状，或提高生产效率，有时甚至能得到高的加工精度。因此，只要其误差不超过规定的精度要求，在生产中仍能得到广泛的应用。

2. 机床误差

加工中，刀具相对工件的成形运动，通常都是通过机床完成的。工件的加工精度在很大程度上取决于机床的精度。机床误差主要来源于机床的制造、磨损和安装误差三个方面，其中对加工精度影响较大的是机床本身的的制造误差，包括主轴回转误差、机床导轨误差和机床传动链传动误差。

（1）主轴回转误差

机床主轴是安装工件或刀具的基准，并传递切削运动和动力给工件或刀具。主轴的回转运动误差，对零件加工表面的几何形状精度、位置精度和表面粗糙度都有直接的影响。

主轴回转时，其回转轴线的空间位置理论上是固定不变的。但是，由于在主轴部件中存在着各种误差和回转时的受力、受热等因素，导致主轴在每一瞬时回转轴线的空间位置都处于变动状态，造成轴线漂移，即存在回转误差。

所谓主轴回转误差是指主轴的实际回转轴线相对其理想回转轴线的变动量。变动量越大，回转精度越低；变动量越小，回转精度越高。实际上，主轴的理想回转轴线虽然客观存在，但其位置很难确定，因此常用平均回转轴线，即主轴各瞬时回转轴线的平均位置来代替。

主轴回转误差可分解为轴向窜动、径向跳动、角度摆动三种基本形式，如图 4-50 所示。

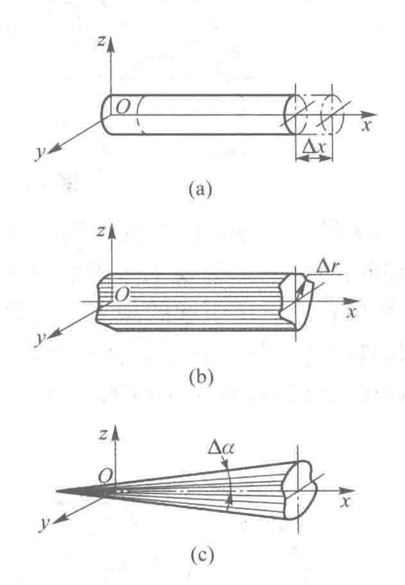


图 4-50　主轴回转误差的基本形式

（a）轴向窜动；（b）径向跳动；（c）角度摆动

1）轴向窜动。主轴瞬时回转轴线沿平均回转轴线方向的轴向运动，如图 4-50（a）所示。它对内、外圆柱面车削或镗孔的影响不大，主要是在车端面时它使工件端面产生垂直度、平面度误差和轴向尺寸精度误差，在车削螺纹时使螺距产生周期性的误差。

2）径向跳动。主轴瞬时回转轴线始终平行于平均回转轴线方向的径向运动，如图 4-50（b）所示。在车削外圆时它会影响工件圆柱面的圆度和圆柱度误差。

3）角度摆动。主轴瞬时回转轴线与平均回转轴线成一倾斜角度，其交点位置固定不变的运动，如图 4-50（c）所示。角度摆动主要影响工件的形状精度，如车外圆时，会产生锥形；镗孔时，将使孔成椭圆形。

实际上，主轴回转误差是上述三种运动方式的合成，因此主轴不同横截面上轴线的运动轨迹既不相同，也不相似，造成主轴的实际回转轴线对其平均回转轴线的“漂移”。

影响主轴回转误差的因素主要有主轴支承轴颈的误差、轴承的误差、轴承的间隙、与轴承相配合零件的误差、箱体支承孔的误差以及主轴刚度和热变形等。对于不同类型的机床和不同类型的主轴结构形式，其影响的因素也各不相同。

提高主轴回转精度的途径主要是提高主轴部件的制造精度，采取措施转移主轴回转误

差，对滚动轴承进行预紧以消除间隙，以及在使用过程中对主轴部件进行良好的维护保养和定期维修等。

(2) 机床导轨误差

机床导轨是机床中确定各主要部件相对位置和运动的基准，是实现直线运动的主要部件，其制造和装配精度以及导轨磨损等是影响直线运动精度的主要因素，直接影响工件的加工精度。导轨误差可分为导轨在水平面内的直线度误差、导轨在垂直面内的直线度误差和两导轨间的平行度误差。下面以卧式车床为例来说明导轨误差对工件加工精度的影响。

1) 导轨在水平面内有直线度误差。如果机床导轨在水平面内有直线度误差，则在纵向进给过程中，刀尖的运动轨迹相对于机床主轴轴线不能保持平行，使工件在纵向截面和横向截面内分别产生形状误差和尺寸误差。当导轨在水平面内产生的误差为 Δy 时，则引起工件在半径方向的误差为 $\Delta R=\Delta y$，如图 4-51 所示。这一误差将直接反映在被加工工件表面的法线方向（误差的敏感方向）上，使工件产生圆柱度误差（鞍形或鼓形）。

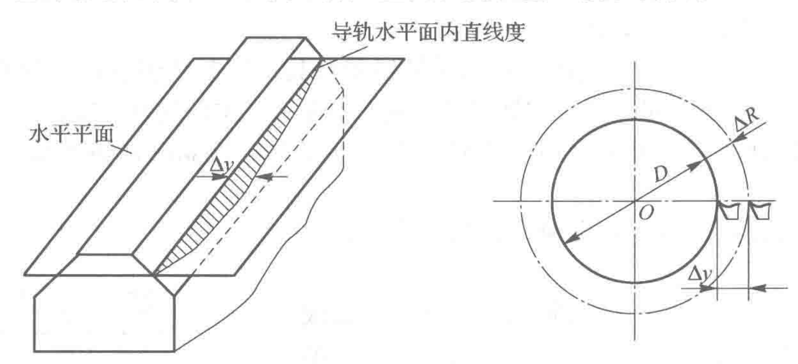


图 4-51 导轨在水平面内的直线度误差

2) 导轨在垂直面内的直线度误差。当机床导轨在垂直面内有直线度误差时，会引起刀尖切向位移 Δz，造成工件在半径方向产生的误差为 $\Delta R\approx$ (Δz) $2/d$，如图 4-52 所示。由于 Δz 数值很小，所引起的加工半径误差 ΔR 也很小，可以忽略。但对于平面磨床、龙门刨床以及铣床等，导轨在垂直面内的直线度误差会引起工件相对于砂轮或刀具产生法向位移，并且直接反映到被加工工件的表面，造成形状误差。

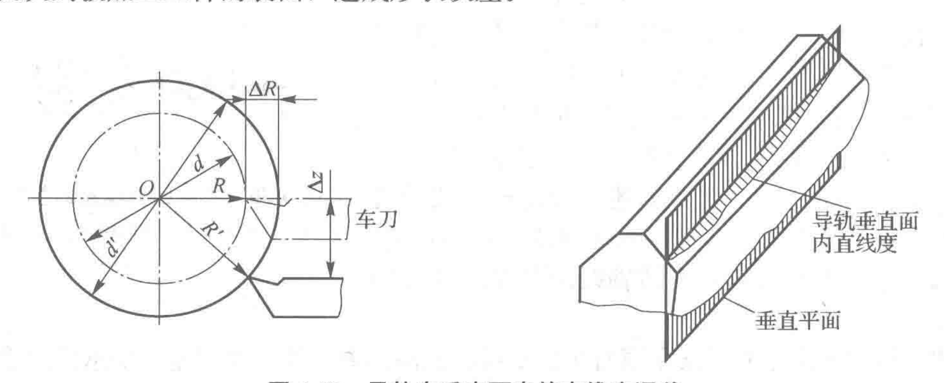


图 4-52 导轨在垂直面内的直线度误差

3) 导轨平行度误差。当机床前后导轨存在平行度误差时，会使车床溜板在沿床身移动时发生偏斜，从而使刀尖相对于工件产生在水平和垂直两个方向产生偏移，使工件产生加工

误差，如图4-53所示。图中，H 为车床中心高，B 为导轨宽度，δ 为前后导轨扭曲量，由几何关系可知，工件在半径方向产生的误差为 $\Delta R = \Delta y \approx \delta H/B$。一般车床 $H/B \approx 2/3$，外圆磨床 $H/B \approx 1$，因此该项误差对加工精度的影响很大。

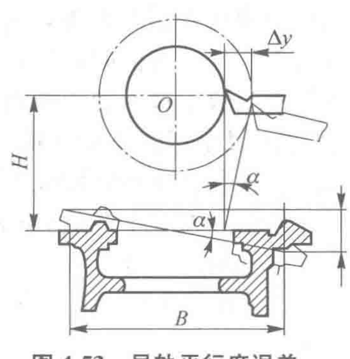


图4-53　导轨平行度误差

机床导轨误差的影响因素主要有以下几个方面：

1）机床制造误差。包括导轨、溜板的制造误差以及机床的装配误差，是影响导轨精度的重要因素。

2）机床安装误差。机床安装不正确引起的导轨误差，往往远大于制造误差。尤其是刚性较差大、重型机床，床身在自重的作用下容易产生变形。机床安装不正确或地基不良，都会造成导轨弯曲变形。

3）导轨磨损。由于使用程度不同及受力不均，导轨沿全长上各段的磨损量不等，就引起导轨在水平面和垂直面内产生位移及倾斜。

因此，为了提高机床导轨的导向精度，应采取提高机床导轨、溜板的制造精度及安装精度，提高导轨的耐磨性，正确安装机床和定期检修等措施。

（3）机床传动链误差

机床的传动链误差是指机床内联系的传动链中首末两端传动元件之间相对运动的误差。传动链误差一般不影响圆柱面和平面的加工精度。但是，在加工刀具与工件之间有严格的传动关系的表面，如螺纹表面、齿形面、蜗轮、螺旋面时，这种传动关系是由机床传动系统中刀具与工件之间的内联系传动链的传动精度来保证，因而是影响加工精度的主要因素。

传动链误差的大小取决于传动链中各传动零件（如齿轮、蜗轮、蜗杆等）的制造、装配误差以及在使用过程中的磨损程度。各传动零件在传动链中的位置不同，对传动链传动精度的影响程度也不同。另外，传动机构越多，传动路线越长，则总的传动误差越大。

要提高机床传动链的精度，一般可以采取缩短传动链长度，提高传动元件的制造和装配精度，采用降速运动，采用误差校正机构，以及加强维护保养等措施。

3. 调整误差

在工艺系统中，工件和刀具在机床上的相对位置精度往往通过调整机床、刀具、夹具、工件等来保证。在加工过程中，要对工件进行检验测量，再根据测量结果对刀具、夹具、机床等进行调整。由于测量和调整都不可能绝对地准确，这样就产生了调整误差。

在机械加工中，零件的生产批量和加工精度往往要求不同，所采用的调整方法也不同。如在单件小批生产时，一般直接根据机床上的刻度或利用量块进行调整；而大批量生产时，则通常采用样板、样件、档块及靠模等调整工艺系统。不同的调整方法，引起调整误差的因素也不同。

（1）试切法加工时的调整误差

在单件小批生产中，通常采用试切法进行加工，引起调整误差的因素主要有：

1）测量误差。测量仪器的制造误差、测量方法以及测量时的主客观因素都会影响测量精度，使加工误差扩大。

2）进给机构的位移误差。在试切中，总是要微量调整刀具的进给量，以便最终达到工件的尺寸精度。但是在低速微量进给中，进给机构常会出现“爬行”现象，即由于传

动链的弹性变形和摩擦，摇动手轮或手柄进行微量进给时，执行件并不运动，当微量进给量累积到一定值时，执行件又突然运动。结果使刀具的实际进给量与刻度盘上显示的数值不一致，造成加工误差。

3）最小切削厚度极限。在切削加工中，刀具所能切削的最小厚度是有一定限度的。当切削余量小于最小切削厚度极限时，切削刃在金属表面打滑，只起挤压作用而不起切削作用，从而形成工件的尺寸误差。

（2）调整法加工

在大批量生产中，一般采用调整法加工，所产生的调整误差与采用的调整方法密切相关。

1）定程机构误差。在半自动机床、自动机床和自动线上，常用行程档块、靠模及凸轮等定程机构来保证加工精度。这些机构的制造精度和刚度，以及与其配合使用的离合器、行程开关、控制阀等的灵敏度等，都是产生调整误差的主要因素。

2）样板或样件误差。在各种仿形机床及专用机床中，常采用专门的样件或样板来调整刀具与工件的相对位置。此时，样件或样板本身的制造误差、安装误差和对刀误差以及使用磨损程度等，都会对调整精度产生影响。

3）对刀装置或引导元件误差。在采用专用铣床夹具或专用钻床夹具加工工件时，对刀块、塞尺和钻套的制造误差，对刀块和钻套相对定位元件的误差，以及钻套和刀具的配合间隙等，是产生调整误差的主要来源。

4.8.3 工艺系统的受力变形对加工精度的影响

在机械加工中，工艺系统在切削力、传动力、惯性力、夹紧力以及重力等外力的作用下，均会产生相应的变形，从而破坏刀具与工件之间已调整好的正确位置关系，使工件产生加工误差。例如，车削细长轴时，工件在切削力的作用下会因弹性变形而出现“让刀”现象，加工后产生腰鼓形的圆柱度误差，如图 4-54（a）所示；又如，在内圆磨床上以横向切入法磨内孔时，由于内圆磨头主轴的弯曲变形，磨出的孔会产生带有锥度的圆柱度误差，如图 4-54（b）所示。

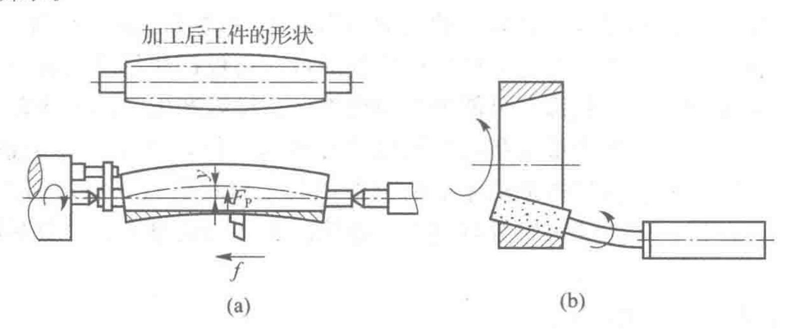


图 4-54　工艺系统受力变形引起的加工误差

（a）车削细长轴；（b）横向切入法磨孔

由此可见，工艺系统的受力变形是一项重要的误差来源，会对工件的加工精度和表面质量产生严重的影响。工艺系统的受力变形通常是弹性变形，一般说来，工艺系统抵抗弹性变形的能力越强，加工精度越高。

1. 工艺系统刚度

(1) 刚度的概念

工艺系统在外力作用下所产生的变形，其大小取决于外力的大小和系统抵抗外力的能力。工艺系统抵抗变形的能力称为刚度。工艺系统在各种外力作用下，将在各个受力方向上产生相应的变形，这里主要研究误差敏感方向，即在通过刀尖的加工表面的法线方向的变形。因此，工艺系统刚度 k_{xt} 定义为加工表面的法向切削力 F_P 与工艺系统的法向变形 y_{xt} 的比值，即

$$k_{xt}=\frac{F_P}{y_{xt}} \tag{4.1}$$

(2) 工艺系统总刚度

在切削力作用下，机床的有关零部件、刀具、夹具和工件都会有不同程度的变形。因此，工艺系统在某一处的法向总变形 y_{xt} 是各个组成部分在该处的法向变形的叠加，即

$$y_{xt}=y_{jc}+y_{dj}+y_{jj}+y_{gj} \tag{4.2}$$

而工艺系统各组成部分的刚度分别为

$$k_{xt}=\frac{F_P}{y_{xt}},\quad k_{jc}=\frac{F_P}{y_{jc}},\quad k_{dj}=\frac{F_P}{y_{dj}},\quad k_{jj}=\frac{F_P}{y_{jj}},\quad k_{gj}=\frac{F_P}{y_{gj}}$$

式中　y_{xt}——工艺系统总的变形量（mm）；

k_{xt}——工艺系统总的刚度（N/mm）；

y_{jc}——机床的变形量（mm）；

k_{jc}——机床的刚度（N/mm）；

y_{dj}——刀具的变形量（mm）；

k_{dj}——刀具的刚度（N/mm）；

y_{jj}——夹具的变形量（mm）；

k_{jj}——夹具的刚度（N/mm）；

y_{gj}——工件的变形量（mm）；

k_{gj}——工件的刚度（N/mm）。

因此，工艺系统刚度的一般计算式为

$$k_{xt}=\frac{1}{\dfrac{1}{k_{jc}}+\dfrac{1}{k_{dj}}+\dfrac{1}{k_{jj}}+\dfrac{1}{k_{gj}}} \tag{4.3}$$

因此，当已知工艺系统的各个组成部分的刚度，即可求出工艺系统刚度。利用刚度的一般计算式求解系统刚度时，应针对具体情况进行具体分析。

(3) 工件、刀具的刚度

工艺系统中，当工件和刀具（包括刀杆）的刚度较低时，会对加工精度造成较大的影响。例如，在车削细长轴时，工件刚度相对于机床、夹具、刀具较低，在切削力的作用下，工件由于刚性不足而引起的变形对加工精度的影响就比较大，而车刀在加工表面法线方向上的刚度很大，其变形可以忽略不计。又如镗直径较小的孔时，刀杆的刚度一般较低，其受力变形会严重影响工件的加工精度，而工件（如箱体零件）的刚度则相对较大，其受力变形很小，可以忽略不计。

工件、刀具的刚度可按材料力学中的有关公式进行计算。例如装夹在卡盘中的棒料以及压紧在车床刀架上的车刀刚度，可按悬臂梁受力变形的公式计算。

$$y_{gj}=\frac{F_P L^3}{3EI} \tag{4.4}$$

$$k_{gj}=\frac{F_P}{y_{gj}}=\frac{3EI}{L^3} \tag{4.5}$$

式中　L——工件（刀具）长度（mm）；

　　E——材料的弹性模量（N/mm^2）；

　　I——工件（刀具）的截面惯性矩（mm^4）；

（4）机床部件刚度

在工艺系统中，工件和刀具的构件和形状一般较为简单，其刚度可直接用材料力学的知识近似地分析计算，而机床和夹具是由许多零件组成的，结构复杂，其刚度很难用公式表示，目前主要是通过实验方法进行测定。测定方法有单向静载测定法和三向静载测定法。因夹具一般总是固定在机床上使用，可视为机床一部分，所以它的刚度通常不作单独讨论。

2. 工艺系统受力变形对加工精度的影响

（1）切削力作用点位置变化对加工精度的影响

在加工过程中，刀具相对于工件的位置是不断变化的，随着切削力作用点位置的变化，工艺系统的受力变形也随之改变。下面以在车床两顶尖间加工光轴为例加以说明。

1）机床变形。在车削粗而短的光轴时，工件的刚度相对很大，其变形可忽略不计，工艺系统的总变形完全取决于机床主轴前端头架、尾座（包括顶尖）和刀架的变形，如图 4-55（a）所示。

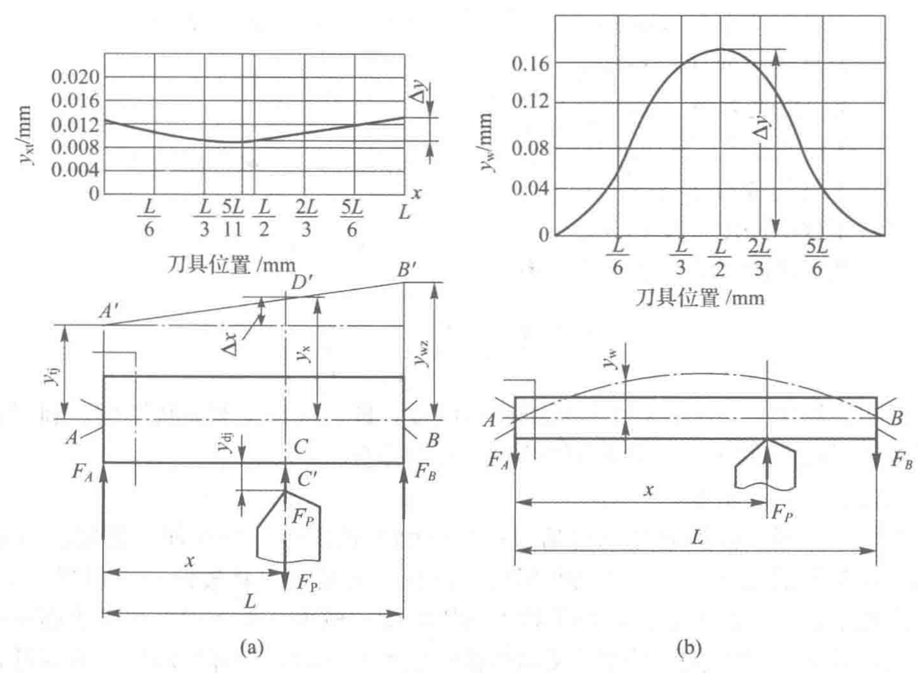


图 4-55　切削力作用点位置的变化对工艺系统变形的影响

（a）车削短轴；（b）车削细长轴

从图中可以看出，工艺系统刚度是随着切削力作用点位置的变化而变化的。当切削力作用点靠近工件的两端时，工艺系统刚度相对较小，变形较大，刀具相对工件产生的让刀量较

大，切去的金属层较薄；而切削力作用点处于工件的中间位置附近时，工艺系统刚度相对较大，变形较小，刀具相对工件产生的让刀量较小，切去的金属层较厚。因此，因机床受力变形而使加工出来的工件会产生两端粗、中间细的马鞍形圆柱度误差。

2）工件变形。在车削细而长的光轴时，由于工件细长，刚度很小，而机床头架、尾座和刀架的刚度相对很大，其变形可忽略不计。因此，工艺系统的总变形完全取决于工件的变形，如图 4-55（b）所示。由材料力学中简支梁公式可以计算工件在切削点的变形量：

$$y_w = \frac{F_P}{3EI}\frac{(L-x)^2x^2}{L} \tag{4.6}$$

根据上述公式，当 $x=0$ 或 $x=L$ 时，$y_w=0$；当 $x=L/2$ 时，$y_{wmax}=\frac{F_P L^3}{48EI}$，此时工件刚度最小、变形最大。因此工件加工后会产生两端基本相同，中间逐渐增粗的腰鼓形圆柱度误差。

由于机床、夹具、刀具、工件等都不是绝对刚体，在切削加工中都会产生一定变形。因此，当切削力作用点位置变化时，工艺系统的总变形为多重因素的叠加，对加工精度的影响也是多种误差形式的综合体现。

（2）切削力大小变化引起的误差

在切削加工中，由于被加工表面的几何形状误差或材料的硬度不均匀，往往会引起切削力大小的变化。工艺系统由于受力大小的不同，变形量也相应发生变化，从而造成工件加工误差。

如图 4-56 所示，车削一个具有椭圆形状误差的毛坯，车削前将刀具调整到图中虚线圆的位置。由于毛坯的圆度误差，工件在每一转中，背吃刀量在最大值 a_{p1} 与最小值 a_{p2} 之间变化。假设毛坯材料的硬度是均匀的，那么切削分力 F_p 也将随着背吃刀量 a_p 的变化而变化，由 F_{p1} 变到 F_{p2}，从而引起工艺系统相应的变形，即刀具相对被加工面产生 y_1 和 y_2 的位移，使毛坯的圆度误差复映到加工后的工件表面，这种现象称为“误差复映”。

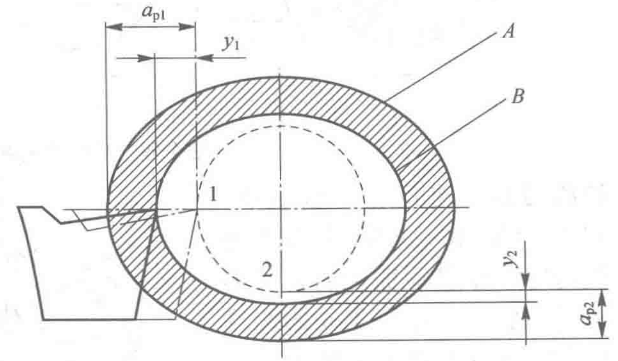


图 4-56　毛坯形状误差的复映

因此，当工件毛坯有形状误差或相互位置误差时，加工后仍然会有类似的误差出现。在成批大量生产中用调整法加工一批工件时，如果因毛坯尺寸不一而导致加工余量不均匀，那么误差复映会造成加工后这批工件的尺寸分散。同样，材料硬度不均匀也会引起切削力的变化，使工件的尺寸分散范围扩大。

（3）工艺系统中其他外力引起的误差

加工过程中，工艺系统除受到切削力的作用外，还受到夹紧力、重力、惯性力、传动力等的作用，在这些力的作用下，工艺系统也将产生变形，从而影响工件加工精度。

1）夹紧力引起的加工误差。工件在装夹时，由于工件刚度较低，夹紧力作用点或作用方向不当，都会使工件产生相应的变形，造成加工误差。特别是薄壁、薄板零件更易引起加工误差。例如，薄壁套筒装夹在三爪卡盘上镗孔时，假定毛坯件是正圆形，夹紧后则呈三棱

形，虽镗出的孔为正圆形，但松开三爪自定心卡盘后，薄壁套筒弹性恢复，使孔变成三角棱圆形，如图 4-57（a）、（b）、（c）所示。

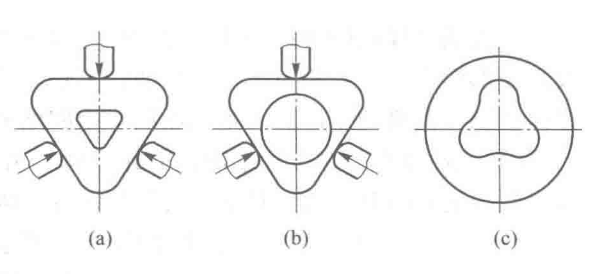
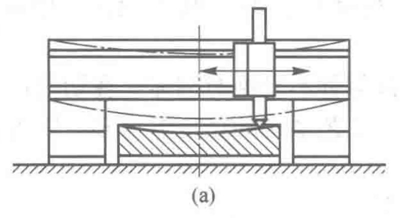


图 4-57 薄壁套筒夹紧变形误差

（a）夹紧后；（b）镗孔后；（c）松开后

2）重力引起的加工误差。工艺系统中，有关零部件自身的重力也会引起相应的变形，造成加工误差。如龙门铣床、龙门刨床刀架横梁，由于主轴箱或刀架的重力而产生变形，从而造成加工表面产生加工误差，如图 4-58 所示。又如镗床的镗杆因自重下垂变形，摇臂钻床的摇臂在主轴箱自重的影响下产生变形等都会造成加工误差。



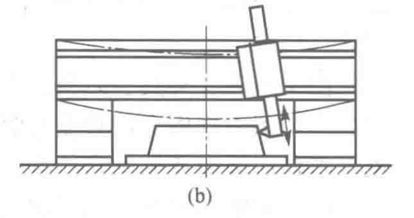


图 4-58 机床部件自重引起的横梁变形

3）惯性力引起的加工误差。切削加工中，高速旋转的零部件（包括夹具、工件及刀具等）的不平衡将产生离心力。离心力在每一转中不断地改变方向，工艺系统的受力变形也随之变化，从而引起加工误差。例如，车削一个不平衡工件时，当离心力 F_q 和切削力分力 F_p 方向相反时，将工件推向刀具，使背吃刀量增加，如图4-59（a)所示。当离心力 F_q 与切削力 F_p 方向相同时，工件被拉离刀具，使背吃刀量减小，如图 4-59（b）所示。从加工表面的每一个横截面上看，其形状呈心脏形，造成工件的圆度误差，如图 4-59（c）所示。

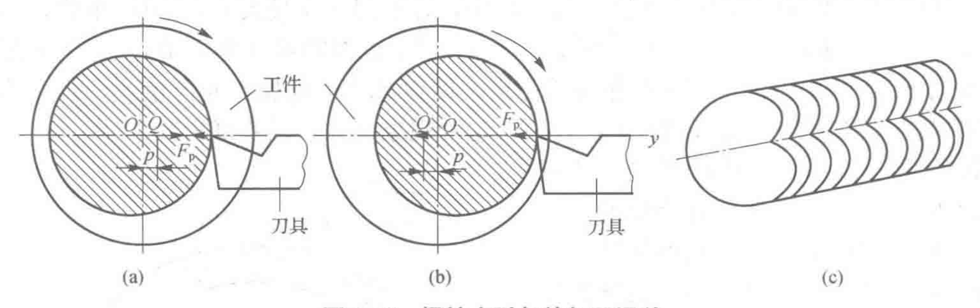


图 4-59 惯性力引起的加工误差

生产中常采用在与不平衡质量的对称方位配置平衡块的方法，使两者离心力互相抵消。此外，适当降低工件转速，也是减小离心力的有效措施之一。

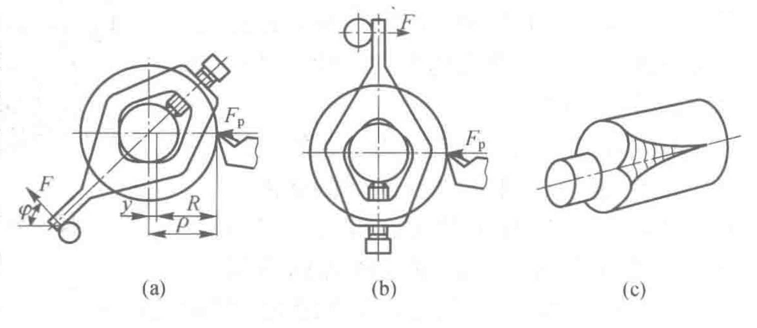


图 4-60 单拨销传动力引起的加工误差

4）传动力引起的加工误差。在车床或磨床类机床加工轴类零件时，常用单爪拨盘带动工件旋转。如图 4-60 所示，传动力 F 在拨盘的每一转中不断改变方向，其在误差敏感方向的分力有时把工件推向刀具，使实际背吃刀量增大，有时把工件拉离刀具，使实际背吃刀量减小，从而在工件上靠近拨盘一端的部分产生呈心脏线形的圆度误差。因此，在加工精密零件时，可改用双爪拨盘或柔性连接装置带动工件旋转。

4. 减小工艺系统受力变形对加工精度影响的措施

减小工艺系统受力变形是保证加工精度的有效途径之一。在生产实际中，减少工艺系统变形的主要措施有以下两个方面，一是提高工艺系统刚度；二是减小切削力及其变化。

（1）提高工艺系统刚度

1）提高接触刚度。一般部件的刚度都是接触刚度低于实体零件的刚度。所以，提高接触刚度是提高工艺系统刚度的关键。常用的方法是改善工艺系统中主要零件接触面的配合质量，如机床导轨副、锥体与锥孔、顶尖与中心孔等配合面采用刮研与研磨，以提高配合表面的形状精度，减小表面粗糙度值，使实际接触面增加，从而有效地提高接触刚度。

提高接触刚度的另一措施是预加载荷，这样可以消除配合面的间隙，增加实际接触面积，减少受力后的变形量，该措施常用于各类轴承的调整之中。

2）提高工件刚度。对于本身刚度较低的工件，如叉架类、细长轴等零件，在切削加工中容易变形，如何提高工件的刚度是提高加工精度的关键。其主要措施是缩小切削力的作用点到支撑之间的距离，以增大零件在切削时的刚度。如车削较长工件时采用中心架增加支承，如图 4-61（a）所示；车削细长轴时采用跟刀架增加支承，以提高工件的刚度，如图 4-61（b）所示。

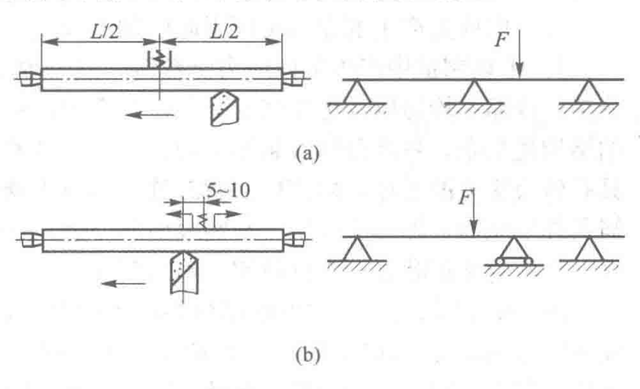


图 4-61　增加支承提高工件刚度

（a）采用中心架；（b）采用跟刀架

3）提高机床部件刚度。在切削加工中，有时由于机床部件刚度低而产生变形和振动，影响加工精度和生产率的提高。此时可采取增加辅助装置，减少悬伸量，以及增大刀杆直径等措施来提高机床部件的刚度。

4）采用合理的装夹和加工方式。加工刚度较低的工件时，应采用合理的装夹方式和加工方法，改变夹紧力的方向，使夹紧力均匀分布，以减少夹紧变形。如前面 4—57 图所示的薄壁套筒，为了减少因夹紧变形造成的加工误差，夹紧时可采用开口过渡环或用弧形三爪等夹具以减少变形，如图 4-62 所示。

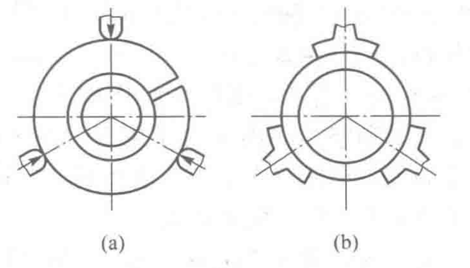


图 4-62　减少薄壁套筒夹紧变形误差的措施

(a) 采用开口过渡环；(b) 采用弧形三爪

（2）减小切削力及其变化

一方面，采取改变刀具的几何参数（如增大前角并使主偏角接近 90°），合理选择切削用

量（如适当减少走刀量和切深）等工艺措施，都可以减小切削力，从而减少受力变形。

另一方面，改善毛坯制造工艺以使毛坯余量更加均匀，对工件进行适当的热处理以改善材料的加工性能等，可以控制和减少切削力的变化幅度，也是减小加工误差的有效途径。

5. 工件内应力引起的变形

（1）内应力的概念

所谓内应力是指外部载荷去除后，仍残存在工件内部的应力，也称为残余应力。内应力主要是由于在热加工和冷加工过程中，金属内部宏观或微观的组织发生了不均匀的体积变化而产生的。

具有内应力的工件处于一种不稳定状态，其内部组织有恢复到一种新的稳定的没有内应力状态的倾向。在常温下，特别是在某些外界因素的影响下，其内部组织在不断地进行变化，直到内应力消失为止。在内应力变化的过程中，工件的形状也会逐渐地变化，导致其原有的加工精度逐渐丧失。用这些零件装配成的机器，在使用中也会不断产生变形，从而影响整台机器的质量。因此，必须采取措施消除内应力对零件加工精度的影响。

（2）内应力产生的原因及所引起的加工误差

1）毛坯制造中产生的内应力。在铸、锻、焊及热处理等热加工过程中，由于工件各部分热胀冷缩不均匀以及组织转变时的体积变化，使毛坯内部产生了相当大的残余应力。毛坯的结构越复杂，各部分厚度越不均匀，散热条件差别越大，毛坯内部产生的内应力就越大。具有残余应力的毛坯，内部应力暂时处于相对平衡状态，短时间内并不显示出变化。但是，当条件变化后，如加工时切去某些表面部分后，这种平衡就被打破，内应力重新分布，并建立一种新的平衡状态，工件就明显地出现变形。

图 4-63 所示为一个内外壁厚相差较大的铸件，在浇铸后逐渐冷却至室温的过程中产生残余应力的情况。如图 4-63（a）所示，由于壁 1 和壁 2 较薄，容易散热，所以冷却较快；而壁 3 较厚，所以冷却较慢。当壁 1 和壁 2 由塑性状态冷却到弹性状态时（620℃左右），壁 3 的温度还比较高，尚处于塑性状态。所以壁 1 和壁 2 收缩时壁 3 不起阻挡作用，铸件内部不产生内应力。但当壁 3 也冷却到弹性状态时，壁 1 和壁 2 的温度已降低很多，收缩速度变得很慢，而这时壁 3 收缩较快，就受到壁 1 和壁 2 的阻碍。因此，在冷却收缩的过程中，壁 3 由于受到壁 1 和壁 2 的阻碍而产生了拉应力，壁 1 和壁 2 则受到压应力，形成了相互平衡的状态。如果在铸件壁 1 上切开一个缺口，如图 4-63（b）所示，则壁 1 的压应力消失，铸件在壁 2 和壁 3 的内应力作用下，壁 3 收缩，壁 2 伸长，铸件就产生了弯曲变形，直到内应力重新分布达到新的平衡为止。

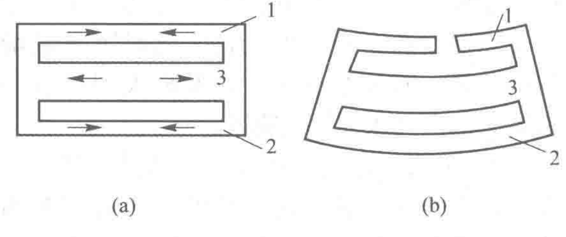


图 4-63　铸件内应力引起的变形

（a）冷却时产生内应力；（b）切口后产生变形

铸件的外表面总比中心部分冷却得快，各种铸件都难免因冷却不均匀而产生内应力，对于一些大型铸件，或局部快冷的铸件尤其严重。

2）冷校直产生的内应力。一些刚度较低的细长轴类零件，如丝杠等，经过车削以后，棒料在轧制中产生的内应力会重新分布，使轴产生弯曲变形，生产中常采用冷校直方法来纠正这种弯曲变形。校直的方法是在室温状态下，将有弯曲变形的轴放在两个支点上，在弯曲

的反方向加外力 F，使工件反方向弯曲，产生塑性变形，以达到校直的目的，如图 4-64（a）所示。在外力 F 的作用下，工件内部残余应力的分布如图 4-64（b）所示，在轴心线以上产生压应力（用负号“－”表示），在轴心线以下产生拉应力（用正号“＋”表示）。在轴线和两条双点划线之间，是弹性变形区域，在双点划线以外是塑性变形区域。当外力 F 去除以后，工件内部的弹性恢复受到外层塑性变形区的阻碍，使内应力重新分布，如图 4-64（c）所示。可见，冷校直虽然减少了弯曲，但工件仍处于不稳定状态，如再次加工，还会产生新的弯曲变形。因此，高精度丝杠不采用冷校直，而是用热校直或加大毛坯余量等方法，来避免内应力的产生。

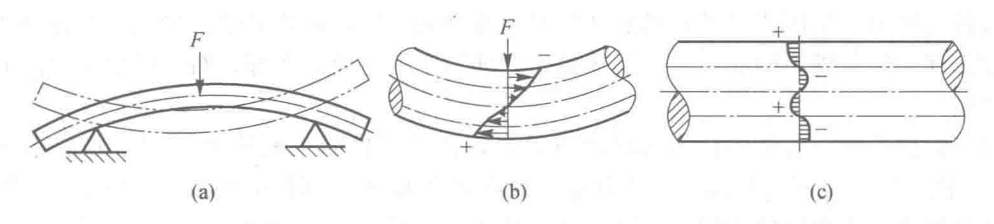


图 4-64　冷校直引起的内应力

3）切削加工中产生的内应力。切削加工时，在切削力和切削热的作用下，工件表面层各部分将产生不同的塑性变形，甚至使金属组织发生变化，这些都会产生内应力，并在加工后引起工件变形。这种内应力的分布情况（应力的大小及方向）由加工时的工艺因素来决定。在很多情况下，切削热的作用大于切削力的作用，特别是高速切削、强力切削、磨削时，切削热的作用占主要地位。如在磨削加工中，表层产生拉应力，严重时会使工件表面产生裂纹。

（3）减少或消除残余应力的措施

1）合理设计零件结构。在零件结构设计中，应尽量简化结构，使壁厚均匀、结构对称，以减少铸锻件毛坯在制造中产生的残余应力。

2）合理安排热处理和时效处理。对铸、锻、焊接件进行退火、回火及时效处理，对精密零件，如丝杠、精密主轴等，应多次安排时效处理，以达到消除残余应力的目的。常用的时效处理方法有自然时效，人工时效和振动时效。

3）合理安排工艺过程。在安排零件加工工艺时，应将粗、精加工分在不同工序中进行，使粗加工后有一定时间让内应力重新分布，以减小对精加工的影响。对粗、精加工在一个工序中完成的大型工件，应在粗加工后先将工件松开，使残余应力可以重新分布，在充分变形后，再用较小的夹紧力重新夹紧工件进行精加工。

4.8.4　工艺系统的热变形对加工精度的影响

1. 基本概念

在机械加工过程中，工艺系统会在各种热源的影响下产生复杂不均的热变形，从而破坏了刀具与工件之间的相对位置关系。工艺系统热变形对加工精度的影响比较大，特别是在精密加工和大型零件加工中，由热变形引起的加工误差通常可占工件总误差的 40%～70%。为减少热变形对加工精度的影响，通常需要采取预热机床以获得热平衡，或降低切削用量以

减少切削热和摩擦热，或粗加工后停机以待热量散发后再进行精加工，或增加工序（使粗、精加工分开）等措施。因此，工艺系统热变形不仅影响加工精度，而且还影响加工效率。随着加工精度以及自动化技术的不断提高，工艺系统热变形问题变得日益突出。

引起工艺系统热变形的热源大致可分为两类，即内部热源和外部热源。

（1）内部热源

内部热源主要包括切削热和摩擦热。

1）切削热。是在切削过程中，由于切削层金属的弹性、塑性变形及刀具与工件、切屑之间摩擦而产生的，这些热量将传给工件、刀具、切屑和周围介质。切削热产生的多少与被加工材料的性质、切削用量及刀具的几何参数等有关。切削热传导的多少和分配百分比也随加工方法和切削条件不同而异。切削热是切削加工中最主要的热源，对工件加工精度的影响最为直接。

如车削加工时，大量的切削热被切屑带走，传给工件的一般约为 30%，传给刀具的约为 5%。铣、刨加工时，传给工件的热量一般在 30%以下。而在钻孔和镗孔加工中，因切屑不能及时排出，使大量的切削热传给工件，热量在 50%以上。磨削加工时约有 80%以上的热量传给工件，加工表面温度可达 800～1000℃，这不仅影响加工精度，严重时还会造成磨削表面烧伤。

2）摩擦热。主要是机床和液压系统中的运动部件产生的，如电动机，电机轴承、齿轮副、导轨副、液压泵、摩擦离合器、阀等运动，均会产生摩擦热。尽管摩擦热比切削热少，但摩擦热在工艺系统中是局部发热，引起局部温升和变形，破坏工艺系统原有几何精度，也会给加工精度会带来严重影响。

（2）外部热源

外部热源主要是外部环境温度和辐射热。环境温度与气温变化、通风、空气对流和周围环境等有关，辐射热主要包括太阳、照明灯、取暖设备、人体等。如靠近窗口的机床受到日光照射的影响，不同的时间机床温升和变形就会不同，而日光的照射是局部的或单面的，其受到照射的部分与未被照射的部分之间产生温差，从而使机床产生变形。因此，外部热源的影响也不可忽视，尤其是在精密加工时会对加工精度产生较大的影响。

工艺系统在各种热源的影响下，温度会逐渐升高；同时，它们也通过各种方式向周围散发热量。当单位时间内传入和传出的热量相等时，则认为工艺系统达到热平衡。当温度场达到平衡并处于稳定状态时，受热变形也相应地稳定，由此引起的加工误差是有规律的，所以，精密加工应在热平衡之后进行。

2. 工件热变形对加工精度的影响

在切削加工中，工件热变形主要是由切削热引起的。对于大型或精密零件，周围环境温度的变化及日光、取暖设备等局部辐射热的影响也是不容忽视的。在热膨胀下达到的加工尺寸，冷却收缩后会发生变化，从而产生加工误差。工件材料、形状、尺寸、加工方法和切削条件不同，其受热变形也不相同。

细长轴在两顶尖间车削时，工件受热伸长，导致弯曲变形。因此，在加工精密轴类零件时，宜采用弹簧顶尖或放松顶尖等措施，以重新调整顶尖与工件间的压力。

平面在刨削、铣削、磨削加工时，由于切削热的作用，工件的上表面温度要比下表面温度高，上下表面间产生温差而引起热变形，导致工件向上凸起。加工过程中，凸起部分被工

具切去，加工完毕冷却后，加工表面就产生了中凹，造成了几何形状误差。

在加工铜、铝等有色金属零件时，由于膨胀系数大，切削热引起的工件热变形尤为显著。此外，室温、辐射热引起的变形量也较大。

通常情况下，工件的热变形对粗加工的加工精度影响较小，一般不必考虑。但是，在流水线、自动线以及工序高度集中的加工中，粗、精加工间隔时间较短，粗加工的热变形就有可能影响到精加工。这时就应该在安排工艺过程时应尽可能把粗、精加工分开，使工件粗加工后有足够的冷却时间，以避免工件热变形对加工精度的影响。

3. 刀具热变形对加工精度的影响

刀具热变形主要是由切削热引起的。切削加工时大部分切削热被切屑带走，传入刀具的热量并不多。但由于热量主要集中在切削部分，而且刀具体积小，热容量小，导致刀具切削部分的温升快，变化大，对加工精度造成很大的影响。例如高速钢刀具车削时，刃部的温度可达 700～800℃，刀具热伸长量可达 0.03～0.05mm。

连续切削时，刀具的热变形在切削初期增加很快，随后变得缓慢，经过不长的时间便达到热平衡状态，此时热变形变化量非常小，对工件加工精度的影响不显著，如图 4-65 中的曲线 *A* 所示。间断切削时，由于车刀不断有短暂的冷却时间，热胀冷缩交替进行，因此其总的热变形量比连续切削时要小一些，最后稳定在 Δt 范围内波动，对工件加工精度影响也不大，如图 4-65 中的曲线 *B* 所示。如车削短小轴类零件就属于这样的情况。当切削停止后，车刀温度立即下降，开始冷却较快，以后便逐渐减慢，如图 4-65 中的曲线 *C* 所示。

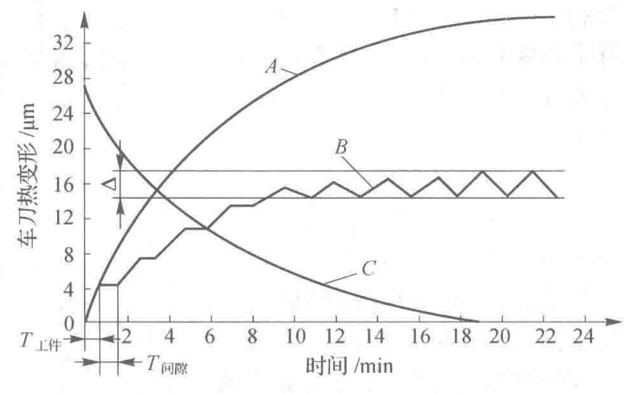


图 4-65　车刀热变形曲线

加工大型零件时，刀具热变形往往造成几何形状误差。如车削长轴时，由于刀具在长时间切削过程中逐渐受热伸长，导致工件产生锥度，表现为尾座处的直径比主轴箱附近的直径大。

减少刀具热变形的措施主要有合理选择切削用量和刀具几何参数，减小刀具伸出长度，以及加工时使刀具充分冷却和润滑等。

4. 机床热变形对加工精度的影响

在加工过程中，机床在内外热源的影响下，各部分温度将发生变化。由于热源分布不均匀和机床结构的复杂性，所形成的温度场是不均匀的，机床各部件将发生不同程度的热变形，从而破坏了机床原有的几何精度，造成加工误差。由于各类机床的结构和工作条件相差很大，引起机床热变形的热源及变形形式各不相同，因此，热变形对加工精度的影响也不相同。

对于车、铣、钻、镗等机床，主要热源是主轴箱轴承的摩擦热和主轴箱油池的发热，使主轴箱及与它相连部分的床身温度升高，造成机床主轴的抬高和倾斜。磨床类机床通常配有高速磨头并有液压传动系统，其主要热源为砂轮主轴轴承的摩擦热和液压系统的发热，引起砂轮架位移、工件头架的位移和导轨的变形。而导轨磨床、外圆磨床、龙门铣床等大型机床

上的长床身部件，由于床身长，床身上表面与底面间的温度差将使床身产生弯曲变形，表面呈中凸状，床身导轨的直线度受到明显影响。常见几种机床的热变形趋势如图 4-66 所示。

在机床达到热平衡状态之前，机床几何精度变化不定，对加工精度的影响也变化不定。运转一段时间之后，机床各部件将达到热平衡状态，变形趋于稳定。因此，精密加工应在机床处于热平衡之后进行。一般车床、磨床的热平衡时间约为 4～6h，中小型精密机床为 1～2h，大型精密机床往往要超过 12h。

5. 减少工艺系统热变形对加工精度影响的措施

（1）减少热源发热和隔离热源

切削过程中，内部热源是使机床产生热变形的主要因素，因此，减少热源发热或隔离热源，是减少机床热变形的有效措施。首先是将热源从机床内部分离出去，如电动机、变速箱、液压系统、切削液系统等产生热源的部件，应尽可能地从主机中移出，使之成为独立单元。

对于不能分离的热源，如主轴轴承、高速运动的导轨副等零部件，可从结构和润滑等方面采取措施，改善摩擦特性，减少热量的产生，如采用静压轴承、空气轴承，或采用低黏度润滑油、锂基润滑脂等措施，均有利于降低主轴轴承的温升。也可采用隔热材料将发热部件和机床大件（如床身、立柱等）隔离开来。

（2）加强散热能力

采用风冷、水冷、循环润滑冷却系统或增加散热面积等散热冷却措施，将大量热量排放到工艺系统以外，从而控制机床的温升和热变形。如使用大流量切削液或喷雾等冷却方法，可带走大量切削热或磨削热。对于大型数控机床、加工中心机床，目前普遍采用冷冻机对润滑油、切削液进行强制冷却，机床主轴轴承和齿轮箱中产生的热量可由恒温的切削液迅速带走。

图 4-66　几种机床的热变形趋势

（a）车床；（b）铣床；（c）平面磨床；（d）双端面磨床

（3）均衡温度场

图 4-67 所示为平面磨床，采用热空气加热温升较低的立柱后壁，以均衡立柱前后壁的温度差，从而减少立柱的弯曲变形的示意图。图中热空气从电动机风扇排出，通过特设的软管引向防护罩和立柱的后壁空间。采用此措施可使磨削平面的平面度误差降低为原来的 1/3～1/4。

（4）采用合理的机床结构

将变速箱中的轴、轴承、传动齿轮等对称布置，可使箱壁温升均匀，减少箱体变形。对机床大件的结构和布局进行合理设计，改善机床的热态特性。如卧式加工中心，在热源的影

响下，单立柱结构会产生较大的扭曲变形。而采用框式双立柱结构，它对热源来说也是对称的，热变形时主轴中心将主要产生垂直方向的位移，这种热变形可以通过调整垂直坐标移动的修正量予以补偿。另外，合理选择机床零部件的安装基准，使热变形尽量不在误差敏感方向，也是提高加工精度的重要措施。

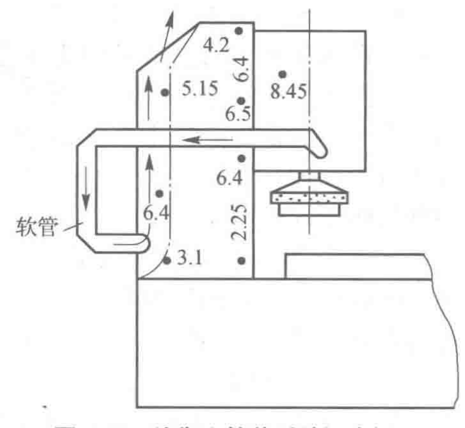


图 4-67　均衡立柱前后壁温度场

(5) 控制温度变化

机床达到热平衡后，其热变形才能逐渐趋于稳定。为了使机床尽快进入热平衡状态，可在加工工件前让机床先做高速空运转，当机床在较短时间内达到热平衡后，再换成工作转速进行加工；或在机床的适当部位设置附加热源，在机床开动初期人为地给机床供热，促使其迅速达到热平衡。

为了避免环境温度变化的影响，精密机床一般安装在恒温车间，恒温精度一般级为±1℃，精密级为±0.5℃，超精密级为±0.01℃；恒温基数一般为 20℃，夏季可取为 23℃，冬季可取为 17℃。精密机床布置时还应避免阳光直接照射。

4.8.5　保证和提高加工精度的途径

在机械加工过程中，为了保证和提高产品加工精度，必须根据产生加工误差的主要因素，采取相应的工艺措施，以减少或控制这些因素的影响。

1. 直接减小或消除误差法

直接减小或消除误差法是查明产生加工误差的主要因素后，设法对其直接进行减少或消除，以提高加工精度，是生产中应用较广的一种基本方法。例如，细长轴是车削加工中较难加工的一种工件，普遍存在的问题是精度低、效率低。正向进给，一夹一顶装夹高速切削细长轴时，由于其刚性特别差，在切削力、惯性力和切削热作用下极易产生弯曲变形，如图 4-68 (a) 所示。

如采用中心架或跟刀架，可大大提高工件刚度，减小加工误差。或采用反拉切削法，即一端用卡盘夹持，另一端采用可伸缩的活顶尖装夹，此时工件受拉不受压，工件不会因偏心压缩或受热而产生弯曲变形，如图 4-68 (b) 所示。此外，采用大进给量和大的主偏角车刀，增大进给力，使切削更平稳，也能提高细长轴的加工精度。

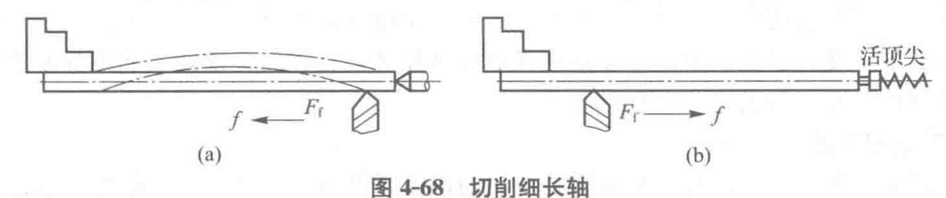


图 4-68　切削细长轴

(a) 正向进给切削法；(b) 反拉切削法

2. 误差补偿法

误差补偿法就是人为地加入一种新的误差，去抵消原来工艺系统中固有的原始误差，尽量使两者大小相等、方向相反，从而达到减少加工误差，提高加工精度的目的。

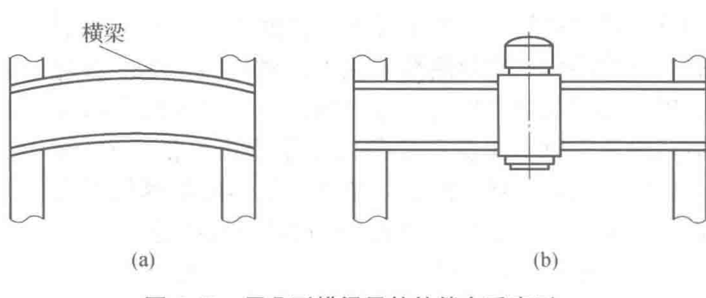


图 4-69　用凸形横梁导轨补偿自重变形

例如，龙门铣床的横梁，在横梁自重和立铣头自重的共同影响下会产生下凹变形。采取加强横梁或减轻自重的办法来直接消除或减少误差往往是不行的。若在刮研横梁导轨时故意使导轨面产生向上凸起的几何形状误差，则装配后就可补偿因横梁和立铣头的重力作用而产生的下凹变形，从而达到机床精度要求，如图 4-69 所示。

3. 误差分组法

生产中常会由于毛坯或半成品加工的误差较大，引起误差复映或定位误差，造成本工序加工误差扩大。误差分组法就是在加工前把毛坯或上道工序加工的工件尺寸经测量后，按大小分为 n 组，每组工件的尺寸误差范围就缩减为原来的 $1/n$；然后按各组工件的加工余量或尺寸变动范围，分别调整刀具与工件的相对位置或选用合适的定位元件，使各组工件的尺寸分散范围中心基本一致，以减小整批工件的尺寸分散范围。这种方法比单纯提高毛坯质量或定位基准的精度要经济得多。

4. 误差转移法

误差转移法就是转移工艺系统的几何误差、受力变形和热变形等误差，使其从误差敏感方向转移到误差的非敏感方向，从而减少对加工精度的影响。当机床精度达不到零件加工要求时，可以通过改进工艺或夹具，使机床的几何误差转移到不影响加工精度的方面去。

如磨削主轴锥孔时，锥孔与轴颈的同轴度，不靠机床主轴的回转精度来保证，而是靠专用夹具的精度来保证，机床主轴与工件主轴之间用浮动连接，机床主轴回转误差被转移，不再影响加工精度。

5. 误差平均法

误差均分法就是有密切联系的表面（如配偶件表面、成套件表面等）的相互比较、相互检查，从对比中找出差异，然后进行相互修正或互为基准加工，使工件被加工表面原有的误差不断缩小和平均化，从而提高工件的加工精度。

例如，对配合精度要求很高的轴和孔，常采用研磨的方法来加工。研具本身精度并不高，分布在研具上的磨料粒度大小也可能不一样，但由于研磨时工件与研具间作复杂的相对运动，使工件上的各点均有机会与研具的各点相互接触并受到均匀的微量切削。高低不平处逐渐接近，几何形状精度也逐步共同提高，并进一步使误差均化，因而获得高于研具原始精度的表面加工精度。在生产中，许多精密基准件（如平板、直尺、角规、端齿分度盘等）的加工都是利用误差平均法加工出来的。

6. 就地加工法

在机械加工和装配中，有些精度问题牵涉到很多零部件的相互关系，单纯依靠提高单个零部件的精度来满足设计要求显然是不经济的，有时甚至不可能达到。就地加工法（又称自身修配法）就是把按经济精度制造的各个相关零部件先行装配，使各零部件处于工作时要求的相对位置，然后以一个表面为基准加工另一个有相互位置精度要求的表面，实现最终精加工，以达到消除装配累积误差，保证高的装配精度的目的。

例如，为了使牛头刨床的工作台面对滑枕保持平行的位置关系，可以在装配以后，用自身刀架上的刨刀刨削工作台台面来保证平行度。平面磨床的工作台面也是在装配后作“自磨自”的最终加工的。在车床上，为了保证三爪卡盘卡爪的装夹面与主轴回转中心同心，也是在装配后对卡爪装夹面进行就地车削或磨削。

4.8.6 机械加工表面质量

1. 表面质量的概念

机器零件的破坏，一般都是从表面层开始的。这是由于表面是零件材料的边界，常常承受工作负荷所引起的最大应力和外界介质的侵蚀，引起应力集中并导致疲劳的裂纹源也往往位于零件的表面，因此，零件的表面质量对产品质量有很大影响。

任何机械加工方法获得的加工表面都不可能是绝对理想的表面，无论看起来多么光亮，实际上总存在着微小的凹凸不平，表面层的材料在加工时还会产生物理和力学性能的变化。

机械加工表面质量是指零件在机械加工后表面的几何特征和表面层的物理、力学性能。表面的几何特征包括表面粗糙度和波度，表面层的物理、力学性能包括塑性变形、组织变化和残余应力等。

（1）表面的几何特征

1）表面粗糙度。它是指加工表面的微观几何形状误差，其波长 $L3$ 与波高 $H3$ 的比值一般小于 50，如图 4-25 所示。表面粗糙度主要是由刀具的形状以及切削过程中塑性变形和振动等因素造成的，评定指标有轮廓算术平均偏差 R_a 和轮廓最大高度 R_z 两项，实际使用时一般选用 R_a，单位 μm。

2）表面波度。它是介于宏观几何形状误差（$L_3/H_3>1000$）与微观几何形状误差之间的周期性几何形状误差，其波长 L_3 与波高 H_3 的比值一般为50～1 000，如图 4-70 所示。表面波度主要是由机械加工过程中工艺系统的低频振动所引起的，通常以波高为波度的特征参数。

（2）表面层物理力学性能

在机械加工中切削力和切削热等因素的共同作用下，加工表面层金属的物理力学性能和化学性能将发生一定的变化。图 4-71（a）表示了加工表面层沿深度方向的变化情况。最外层有氧化膜或其他化合物生成，并吸收、渗入了气体、液体和固体粒子，称为吸附层，其厚度一般不超过 8nm。次外层为机械加工过程中由切削力造成的表面塑性变形区，称为压缩层，厚度约为几十至几百微米，随加工方法的不同而变化。其上部为纤维层，是由被加工材料与刀具之间的摩擦力所造成的。另外，切削热也会使表面层产生各种变化，如同淬火、回火一样使材料产生相变以及晶粒大小的变化等。因此，表面层的物理力学性能不同于基体，主要表现在以下几个方面：

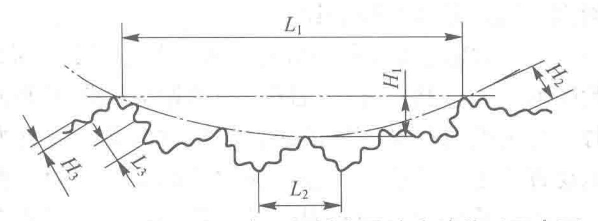


图 4-70 形状误差、表面粗糙度及波度的关系示意图

1）表面层加工硬化。是指工件在机械加工过程中，表面层金属产生强烈的冷塑性变形，使金属的强度和硬度显著提高，塑性和韧性明显下降的现象，又称冷作硬化，如图 4-71（b）所示。

2）表面层金相组织变化。是指在机械加工过程中，由于切削热的作用，工件加工区域的温度急剧升高，当温度超过工件材料的相变临界点时，就会导致表面层金相组织的变化。如磨削淬火钢件时，常会出现回火烧伤等金相组织变化，对零件的使用性能造成严重的影响。

3）表面层产生残余应力。是指机械加工过程中，由于切削力和切削热的综合作用，在表面层产生的内应力，如图4-71（c）所示。

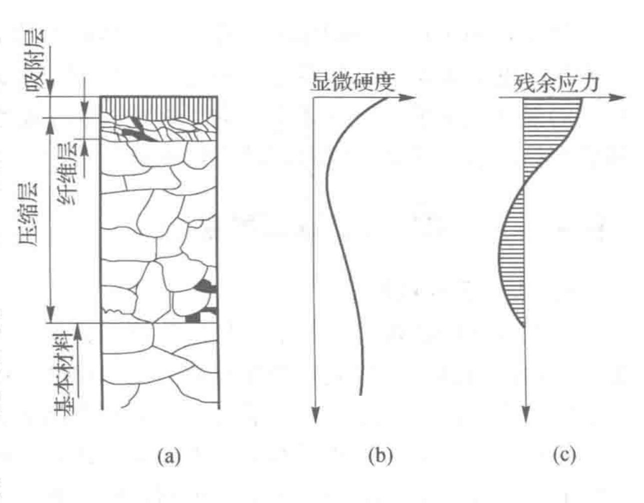


图 4-71 加工表面层沿深度方向的变化情况

2. 加工表面质量对机器零件使用性能的影响

（1）表面质量对零件耐磨性的影响

1）表面粗糙度的影响。由于零件表面总是存在着一定程度的粗糙不平，当两个零件的表面互相接触时，实际上是在一些凸峰顶部接触，因此实际接触面积只是名义接触面积的一部分。据统计，车削、铣削和铰孔加工后，零件两表面的实际接触面积为15％～20％，精磨后为30％～50％；超精加工后为90％～97％。

由于接触面积小，当零件受到正压力时，实际接触的凸峰部分将产生很大的压强，超过材料的屈服极限时，就会产生塑性变形；两表面相对运动时，实际接触的凸峰处就可能产生接触面的塑性滑移或剪切折断等现象，引起表面的磨损。

表面粗糙度对零件表面磨损的影响极大，一般来说，表面粗糙度值越低，其耐磨性越好。但粗糙度值也不是越低越好，当表面粗糙度值过低时，一是不利于润滑油的储存，难以获得良好的润滑条件；二是接触表面之间分子亲和力增加，甚至发生分子粘合，使摩擦阻力增大，反而导致磨损加剧。

2）表面纹理方向的影响。表面加工纹理方向对耐磨性也有很大影响，这是因为表面粗糙度的轮廓形状及加工纹路方向能影响金属表面的实际接触面积和润滑油的存留情况。轻载时，在两相对运动零件的表面纹理方向均与运动方向一致的情况下，磨损最小，这是因为在运动方向上不易受另一表面波纹度阻碍；当两表面纹理方向与相对运动方向垂直时，磨损最大。但在重载时，两相对运动零件的表面纹理方向均与相对运动方向一致时容易发生咬合，磨损反而增大；两相对运动零件的表面纹理方向相互垂直，且运动方向平行于下表面的纹理方向时，磨损量较小。

3）表面层物理力学性能变化的影响。加工硬化可以提高零件表面金属层的强度和硬度，增加摩擦副接触表面抵抗塑性变形和咬合的能力，从而提高耐磨性。如Q235钢在冷拔加工后硬度提高15％～45％，磨损量可减少20％～30％。但过度的加工硬化会引起表面层金属的组织疏松，严重时会产生裂纹和表层剥落，使耐磨性下降。

（2）表面质量对零件疲劳强度的影响

1）表面粗糙度的影响。在交变载荷作用下，零件表面微观不平的凹谷、划痕和其他表面缺陷处都容易引起应力集中，因而产生疲劳裂纹，造成零件的疲劳损坏。金属零件的疲劳

破坏一般都是从表面层开始的，所以表面粗糙度对零件的疲劳强度影响很大。实验表明，对于承受交变载荷的零件，减小零件表面粗糙度值，可以明显提高零件的疲劳强度。因此，生产上常对一些承受交变载荷零件的重要部位，如曲轴的曲拐与轴颈交接处，在精加工后再进行光整加工，以减小零件的表面粗糙度值，提高疲劳强度。

2）表面冷作硬化的影响。表面层金属存在一定程度的加工硬化，可以阻碍疲劳裂纹的产生和已有裂纹的扩展，从而提高零件的疲劳强度。但表面层硬化程度过高时，可能会产生较大的脆性裂纹，反而使疲劳强度降低，所以零件的加工硬化程度与硬化深度应控制在适当的范围之内。

3）残余应力的影响。表面层为残余压应力时，能部分抵消交变载荷施加的拉应力，延缓疲劳裂纹的产生和扩展，从而提高零件的疲劳强度；而为残余拉应力时，则容易使零件表面产生裂纹，导致零件的疲劳强度降低。因此，表面层的残余应力对零件疲劳强度也有很大影响。

（3）表面质量对零件耐腐蚀性的影响

零件的耐腐蚀性在很大程度上取决于零件的表面粗糙度。零件在潮湿的空气或腐蚀介质中工作时，常发生化学腐蚀和电化学腐蚀。零件表面越粗糙，腐蚀性介质越容易在表面的凹谷处吸附和聚集，对零件的渗透与腐蚀作用就越强烈。当零件表面层存在残余压应力时，有助于已有表面微裂纹的封闭，增强零件的耐腐蚀性。因此，减小零件表面粗糙度值，使表面具有适当的残余压应力，均可提高零件的耐腐蚀性能。

（4）表面质量对零件配合质量的影响

对于相互配合的零件来说，无论是间隙配合、过渡配合，还是过盈配合，如果配合表面的粗糙度值过大，必然会影响它们的实际配合性质。

对于间隙配合的表面，如果粗糙度值过大，初期磨损量就大，使配合间隙很快增大，从而降低配合精度，改变原有的配合性质，很可能导致机器出现漏气、漏油或晃动等故障而影响正常工作。

对于过盈配合的表面，在将轴压入孔时，配合表面的部分凸峰会被挤平，使实际过盈量减小。如果粗糙度值过大，会降低配合件之间连接强度，影响配合的可靠性。并且，即使在设计时对过盈量进行一定的补偿，其过盈配合的强度与具有同样有效过盈量的低粗糙度的配合零件的过盈配合相比，仍然低很多的。因此，对有配合要求的表面，一般都要求有较低的表面粗糙度值。

过渡配合兼有上述两种配合的问题。

3. 影响加工表面粗糙度的工艺因素

在机械加工中，表面粗糙度的形成原因主要有几何因素和物理因素两个方面。几何因素主要与刀具几何角度及刀刃和工件的相对运动轨迹有关，物理因素主要与被加工材料性质及切削机理有关。不同的加工方法，因切削机理不同，产生的表面粗糙度也不同，一般磨削加工表面的表面粗糙度值小于切削加工表面粗糙度值。下面就切削加工和磨削加工分别进行说明。

（1）切削加工表面粗糙度的形成

1）几何因素。刀具相对工件作进给运动时，会在加工表面上遗留一定的切削层残留面积，在理想切削条件下，该残留面积就形成了理论表面粗糙度，如图 4-72 所示。

如果使用直线切削刃切削，刀尖圆弧半径为零，残留面积高度 H 为

$$H=\frac{f}{\cot\kappa_r+\cot\kappa_r{}'} \tag{4.7}$$

如果使用圆弧切削刃切削，刀尖圆弧半径为 r_ε，残留面积高度 H 为

$$H\approx\frac{f^2}{8r_\varepsilon} \tag{4.8}$$

由上两式可以看出，减小主偏角 κ_r、副偏角 $\kappa_r{}'$ 和进给量 f，增大刀尖圆弧半径 r_ε，都能有效地降低残留面积高度。

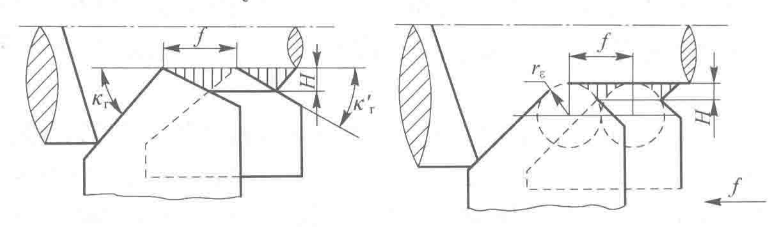


图 4-72　切削层残留面积

2）物理因素。产生表面粗糙度的物理因素主要是切削过程中的塑性变形、摩擦、积屑瘤、鳞刺以及工艺系统中的高频振动等。在切削过程中，刀具刃口圆角及后刀面对工件的挤压与摩擦，使工件已加工表面发生弹性、塑性变形，促使表面粗糙度增大。加工塑性材料时，如果切削速度较低，容易产生积屑瘤和鳞刺，导致表面粗糙度增加。此外，工艺系统中的高频振动使刀刃与工件相对位置发生微幅变动，在加工表面留下振纹，从而影响表面粗糙度。在实际切削加工时，由于上述物理因素的影响，加工表面的实际粗糙度与理论粗糙度有较大的差别。

（2）影响切削加工表面粗糙度的工艺因素

1）切削用量。切削加工塑性材料时，在一定的切速范围内容易产生积屑瘤或鳞刺，对加工表面的粗糙度造成较大影响。实际生产中，在切削低碳钢等塑性较好的金属材料时，往往选择低速宽刀或高速切削，以得到较小的表面粗糙度值。

背吃刀量一般对表面粗糙度影响不大。但当背吃刀量过小时，刀尖与工件表面发生挤压与摩擦，形成附加的塑性变形，导致表面粗糙度值增大。

减小进给量可减少加工表面残留面积高度，从而有效地减小表面粗糙度值。

2）刀具材料和几何参数。刀具材料与被加工材料分子间的亲和力大时，易产生积屑瘤。例如，在切削条件相同时，用硬质合金刀具加工的工件表面粗糙度值比用高速钢刀具加工小；用金刚石车刀精车铝合金时，由于摩擦因数低，刀面上不容易产生切屑的黏附、冷焊现象，因此，可以获得粗糙度值更小的表面。

刀具的几何参数对塑性变形、积屑瘤和鳞刺的产生均有较大的影响。适当增大前角，使刀具易于切入工件，可以减小金属塑性变形和切削力，降低切削温度，抑制积屑瘤的产生；适当增大后角，可以减小后刀面与加工表面间的摩擦和挤压；增大刃倾角，实际工作前角也随之增大，这些都有利于减小表面粗糙度值。

3）切削液。在切削加工过程中，切削液起冷却和润滑的作用，可以降低切削区的温度，减少刀刃与工件的摩擦，从而减少切削过程的塑性变形，抑制积屑瘤和鳞刺的生成。因此，合理选择润滑液，提高冷却润滑效果，有利于减小表面粗糙度值。

4）工件材料性能。一般来说，塑性材料加工时，容易产生塑性变形，与刀具的粘结作用也较大，加工后表面粗糙度值较大。因此，对于低碳钢和中碳钢等材料的工件，常在切削加工前安排调质或正火处理，其目的就是为了改善工件的切削性能，减小表面粗糙度值。但

是材料脆性过大时，切屑呈碎粒状，切屑的崩碎又在加工表面留下许多麻点，也会使表面粗糙度值变大。

（3）磨削加工表面粗糙度的形成

1）几何因素。磨削加工表面是由分布在砂轮表面上的磨粒与被磨工件作相对运动产生的刻痕所形成的。通过单位面积的磨粒越多，并且刻痕均匀细密，则表面粗糙度值就越小。实际磨削过程中不仅有几何因素，还会受到塑性变形等物理因素的影响。

2）物理因素。一方面，砂轮上大多数磨粒具有很大的负前角，且磨粒刃口较钝，在磨削过程中，磨粒的切削厚度很薄，所以磨粒切削作用不大，主要是在工件表面上刻划和滑擦，使金属材料在磨粒侧面流动，刻划出的沟槽两边伴随着塑性隆起，因而增大了表面粗糙度值。另一方面，磨削速度远大于刀具切削速度，其磨粒在工件表面上刻划和滑擦时，会产生很高的磨削温度，往往超过材料的相变温度，甚至使表面微熔，更易于塑性变形，进一步增大表面粗糙度值。

（4）影响磨削加工表面粗糙度的工艺因素

1）磨削用量。砂轮速度大时，参与切削的磨粒数增多，可以增加工件单位面积上的刻痕数，同时，高速磨削时塑性变形不充分，有利于表面粗糙度值的减小。磨削深度增加时，磨削力和磨削温度都会增加，塑性变形加剧，导致表面粗糙度值增大。实际生产中，通常在开始磨削时采用较大的磨削深度，以提高磨削效率，然后采用小的磨削深度或光磨，以减小表面粗糙度值。

2）砂轮。砂轮的粒度越细，单位面积上的磨粒数越多，工件表面上的刻痕密细，则表面粗糙度值越小。但磨粒过细时，砂轮易被磨屑堵塞，使工件表面塑性变形增加，反而增大粗糙度值。砂轮的硬度应适宜，砂轮太硬，磨粒钝化后不能及时脱落，使工件表面塑性变形程度增加，粗糙度值增大；而砂轮太软，磨粒易脱落，常会出现磨损不均匀现象，也会使表面粗糙度值变差。砂轮应及时修整，以去除已钝化的或被磨屑堵塞的磨粒，保证砂轮具有足够的等高微刃，使工件获得较小的表面粗糙度值。

3）工件材料。工件材料的硬度、塑性、韧性和导热性能等对表面粗糙度有显著影响。工件材料太硬时，磨粒易钝化，太软时砂轮易堵塞；工件材料的塑性、韧性大和导热性差，容易导致磨粒早期崩落，破坏了微刃的等高性，以上因素都会使表面粗糙度值增大。

4）切削液和其他。磨削切削液对减小磨削力、降低磨削区域温度、减少砂轮磨损等都有良好的效果，正确选择切削液有利于表面粗糙度值的减小。

磨削工艺系统的刚度、主轴回转精度、砂轮的平衡、工作台运动的平衡性等，都将影响砂轮与工件的瞬时接触状态，从而影响表面粗糙度。

4.8.7　机械加工过程中的振动

1. 基本概念

机械加工过程中，工艺系统常常会出现振动。振动发生时，工件和刀具之间产生相对位移，影响了工件和刀具之间正常的运动轨迹，使零件加工表面产生振纹，降低了零件的加工精度和表面质量；工艺系统持续承受动态交变载荷的作用，会加速刀具的磨损，引起崩刃打刀现象；振动会导致机床、夹具的连接部分松动，影响运动副的工作性能，导致机床丧失精度，严重时，强烈的振动会使切削过程无法进行。此外，振动还会产生强烈的噪声，污染环

境，危害操作者的健康。为此，生产中常常不得不降低切削用量，从而限制了生产率的提高。

机械加工中过程中的振动，按其产生的原因可分为以下三类：

1）自由振动。是指工艺系统受到初始干扰力（又称激振力）的作用而破坏了平衡状态后，去掉激振力或约束后所发生的振动。机械加工过程中的自由振动往往是由于切削力突然改变或其他外界力的冲击等原因引起的。由于系统总是存在阻尼，所以自由振动一般可以迅速衰减，对机械加工过程影响较小。

2）强迫振动。是指在外界周期性干扰力（又称激振力）的作用下，工艺系统受迫产生的振动。由于有外界周期性干扰力作能量补充，所以振动能够持续进行。强迫振动的频率等于外界周期性干扰力的频率或者是它的整数倍。

3）自激振动。是指在没有周期性外力作用的条件下，由振动系统本身产生的交变力激发和维持的一种稳定的周期性振动。切削过程中产生的自激振动也称为颤振。

2. 机械加工中的强迫振动

（1）强迫振动产生的原因

强迫振动的振源有来自机床外部的机外振源和来自机床内部的机内振源。

1）外部振源。是来自系统外部的周期性干扰力，如其他机床、设备通过地基传入系统的振动，此类振源都可以通过加设隔振地基来隔离。

2）内部振源。机床运动零件的惯性力引起振动的激振力，如电机转子、带轮、齿轮、砂轮等零件的质量偏心在高速回转时产生的离心力；往复运动部件换向时的冲击；机床传动件的缺陷会成为周期性干扰力；切削过程的不连续或者余量和硬度不均匀引起的切削力周期性改变而产出的冲击。

（2）强迫振动的特点

1）强迫振动是在外界周期性干扰力作用下产生的，振动本身不会引起干扰力的变化。当干扰力停止时，则工艺系统的振动也随之停止。

2）强迫振动的频率与干扰力的频率相同，或是扰力的频率整数倍。这种频率的对应关系是诊断机械加工中所产生的振动是否为强迫振动的主要依据，并可以用来分析、查找强迫振动的振源。

3）强迫振动的振幅大小与干扰力的大小、系统的刚度、阻尼系数以及干扰力的频率有关。干扰力越大、系统刚度及阻尼系数越小，振幅就越大；当干扰力的频率与工艺系统固有频率的固有频率相同时，系统将产生共振。

4）强迫振动的位移变化总是比干扰力在相位上滞后一个 ϕ 角，其大小与系统的动态特性及干扰力的频率有关。

3. 机械加工中的自激振动

（1）自激振动的产生条件

自激振动系统是一个由振动系统和调节系统组成的闭环反馈控制系统，如图 4-73 所示。该系统维持稳定振动的条件是，在一个振动周期内，从能源机构经调节系统输入振动系统的能量等于系统阻尼所消耗的能量。维持自激振动的能量来自机床电动机，电动机除了供给切除切屑的能量外，还通过切削过程把能量输给振动系统，使机床系统产生振动。

机械加工中的自激振动与强迫振动不同，它是由外部激振力的偶然触发而产生的一种不

衰减运动，但维持振动所需的交变力是由振动过程本身产生的。因此，一但切削运动停止，交变力也随之消失，自激振动也就停止了。

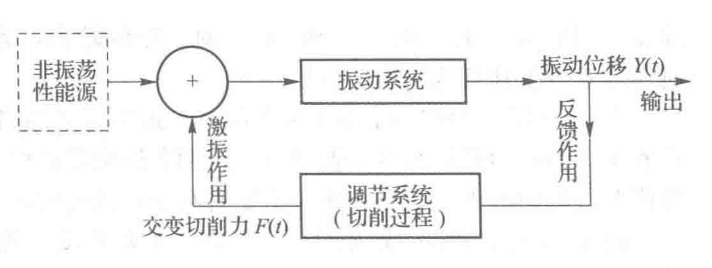


图 4-73　自激振动系统的组成

（2）自激振动的特点

1）机械加工中的自激振动是在没有周期性外力干扰下所产生的振动，与强迫振动有着本质区别。

2）自激振动的频率等于或接近系统的某一固有频率，或者说，自激振动的频率取决于振动系统的固有特性，这一点也与强迫振动根本不同。

3）自激振动是否产生以及振幅的大小取决于振动系统在同一个振动周期内，从能源输入到振动系统的能量是否等于振动系统所消耗的能量。如果吸收的能量大于消耗能量，振动会不断加强；反之，振动将不断衰减而被抑制。

4. 机械加工中振动的控制

（1）减少或消除强迫振动的措施

1）减小激振力。减小激振力可以有效地减小振幅，使振动减弱或消失。对于不同类型的激振力，应采取不同的措施，例如，对转速在 600r/min 以上的回转零件，如砂轮、卡盘、电动机转子及刀盘等，必须进行动平衡，以减小和消除离心惯性力；对于齿轮传动，应提高齿轮的制造及安装精度，以减小传动过程中的冲击；对带传动，应采用较完善的皮带接头，使其连接后的刚度和厚度变化最小；对于高精度机床，尽量少用或者不用齿轮、平皮带等可能成为振源的传动元件，并使电机、液压系统等动力源与机床本体分离；对于往复运动部件，应采用较平稳的换向机构。

2）调节振动频率。3）增强机床或整个工艺系统的刚度和阻尼。提高工艺系统的刚度，可以有效地提高机床加工系统的稳定性，增强系统的抗振性能，从而消除或减弱振动的发生。增强连接结合面的接触刚度，对滚动轴承施加预载荷，加工细长工件在选择转速时，可以采取改变电动机转速、传动比，或改变切削刀具的齿数等措施，尽可能使旋转件的频率远离机床有关元件的固有频率，以避免发生共振。

外圆时采用中心架或跟刀架，镗孔时对镗杆设置镗套等措施，都可以提高工艺系统的刚度。

4）消振和隔振。隔振通常是在振动传递的路线上设置弹性隔振装置，将需要防振的机床或部件与振源分开，使大部分振动被吸收，以减少振源对加工过程的干扰。如在机床与安装地基之间加橡皮垫片，或在振源与刀具和工件之间设置弹簧或橡皮垫片。常用的隔振材料有橡皮、金属弹簧、空气弹簧、软木、矿渣棉等。为了消除系统外振源的影响，常在机床周围挖防振沟。

（2）减少或消除自激振动的措施

1）合理选择切削用量。图 4-74 所示为在一定条件下车削时，切削速度 v_c 与自激振动振幅 A 的关系曲线。

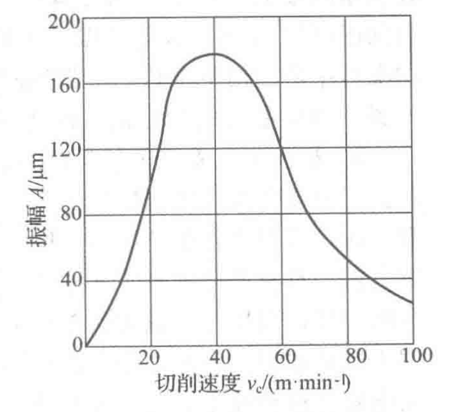


图 4-74　切削速度与振幅的关系

从图中可看出，在 $v_c=20\sim60\text{m/min}$ 时，振幅较大，容易产生自激振动。因此，生产中常选用高速或低速切削来避免自激振动。

图 4-75 所示为在一定条件下车削时，进给量 f 与自激振动振幅 A 的关系曲线。从图中可看出，当进给量较小时，振幅较大；随着进给量的增加，振幅减小。因此，在加工表面粗糙度允许的情况下，适当加大进给量有利于自激振动的减小。

图 4-76 所示为在一定条件下车削时，切削深度（背吃刀量）a_p 与自激振动振幅 A 的关系曲线。从图中可以看出，随着切削深度的增加，振幅也增大。因此，减小切削深度可以减小自激振动。但切削深度过小会降低生产率，所以通常在选取较小的切削深度的同时，采用提高切削速度和增大进给量的办法，来避免或减小自激振动，又可保持一定的生产率。

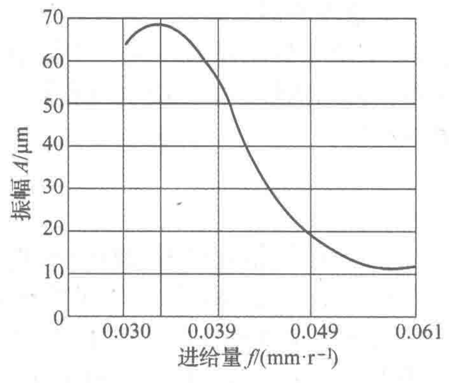


图 4-75 进给量与振幅的关系

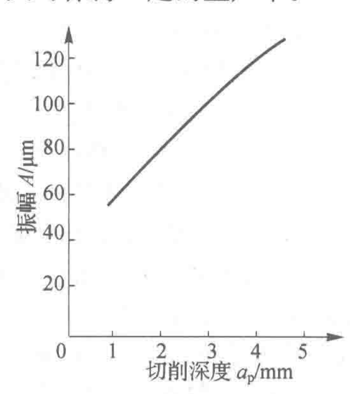


图 4-76 切削深度与振幅的关系

2）合理选用刀具的几何参数。试验和理论研究表明，刀具的几何参数中，主偏角 κ_r 和前角 γ_0 对振动的影响最大，后角 α_0 在一定条件下也会对振动产生较大的影响。主偏角增大时，垂直于加工表面方向的切削分力减小，实际切削宽度减小，振幅将逐渐减小；当 $\kappa_r=90°$时，振幅最小；当 $\kappa_r>90°$时，振幅增大，如图 4-77 所示。随着前角的增大，振幅将随之减小，如图 4-78 所示。但在切削速度较高时，前角对振动的影响将减弱，所以高速切削时用负前角也不致产生强烈的振动。适当减小刀具后角，当$\alpha_0=2°\sim3°$时，振动将明显减弱。通常在刀具主后面上磨出一段负倒棱，能起到很好的消振作用，如图 4-79 所示。

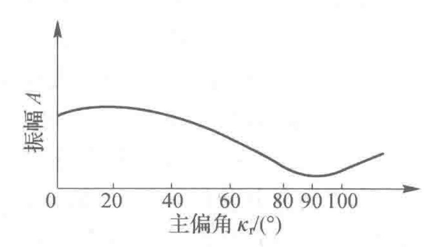


图 4-77 主偏角对振幅的影响

3）提高工艺系统的抗振能力。选择内阻尼大的材料，可以增大工艺系统的阻尼。例如，铸铁阻尼比钢大，故机床的床身、立柱等大型支承件均用铸铁制造。通过刮研、施加预紧力等方法，可以增大系统部件之间的摩擦阻尼。采用中心架、跟刀架，提高顶尖孔的研磨质量等方法，都有助于提高工艺系统的抗振性。使用高弯曲与扭转刚度、高弹性模数、高阻尼系数的刀具，以增加刀具的抗振性。例如，采用图 4-80 所示的削扁镗杆进行镗孔时，可以根据需要调整刀头的方位角和镗杆刚度的比值，以提高系统的抗振性，抑制自激振动。图 4-81 为削扁镗杆镗孔示意图，实验表明，当 $0°<\alpha<60°$时，系统最不稳定，产生强烈的自激振动；当 $110°<\alpha<150°$时，系统最稳定，不会出现自激振动。

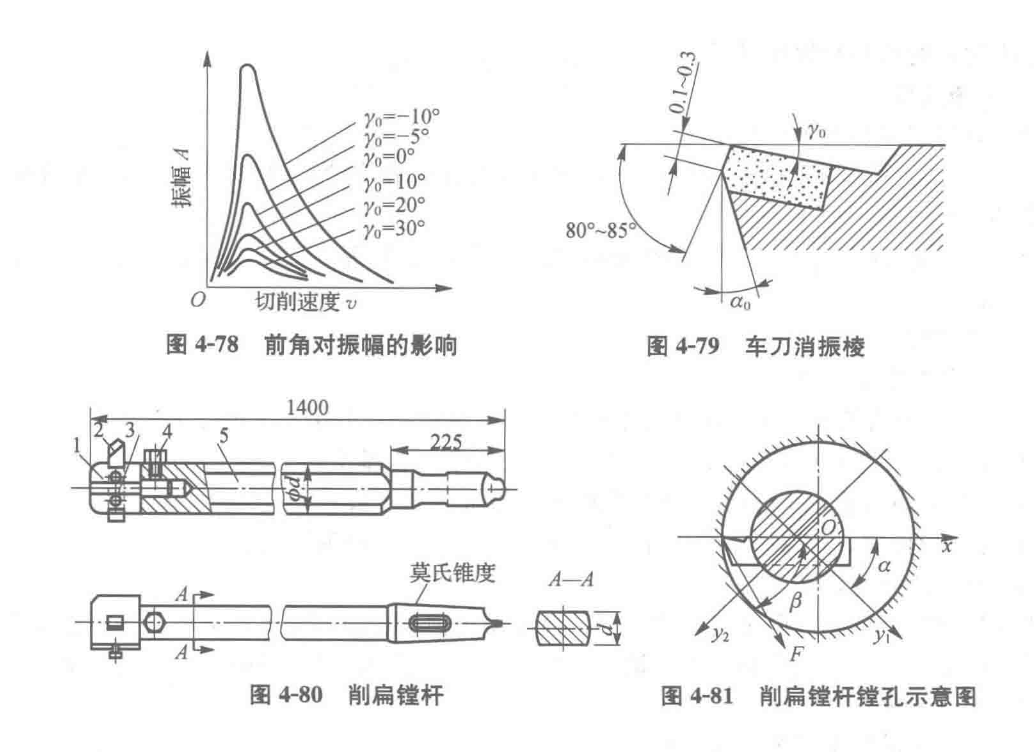


图 4-78　前角对振幅的影响

图 4-79　车刀消振棱

图 4-80　削扁镗杆

图 4-81　削扁镗杆镗孔示意图

4.9　项目实施

1. 任务分析

4.1 节中的任务是编制定位套的机械加工工艺过程卡和工序卡。该定位套从结构上看是一个典型的套类零件，工件材料为HT200，调质处理为 HBS217～255，各尺寸精度、表面粗糙度等技术要求均在正常加工要求范围内，中小批量生产。因此，学生在已经掌握的机械制图、公差与配合、工程材料、机械设计基础等相关专业基础知识，和车工、钳工等实践技能的基础上，按照项目二中机械加工工艺规程的设计方法与步骤，综合运用项目三和项目四中所学的关于套类零件的毛坯选择、内外圆表面加工方法、加工设备和刀具、装夹和测量方法等知识和技能，就可以完成定位套的机械加工工艺过程卡和工序卡的编制任务。

2. 工作计划

（1）明确任务

学生以 3～5 人为一项目小组的形式实施任务，以利于小组成员之间开展协作与交流，培养学生的团队精神。根据任务要求，共同分析完成任务所需掌握的知识、技能和相关技术资料，明确小组成员的任务分工。分工时应做到责任明晰，任务量均衡饱满。

（2）收集资料

小组成员根据任务分工，收集与套类零件工艺规程编制相关的工艺文件和技术资料。

（3）实施任务

围绕所研究的任务查阅资料，收集数据，共同探讨定位套机械加工工艺过程卡和工序卡的编制具体方法与步骤，制定出详细的任务实施方案。项目组成员根据各自的任务分工，按

照方案中制定的内容和程序展开工作。

3. 实施过程

(1) 分析定位套的主要技术要求

1) $\phi30^{+0.013}_{+0.002}$外圆柱面对$\phi20^{+0.021}_{0}$内孔的同轴度允差为$\phi0.02$ mm，表面粗糙度为$R_a1.6\mu m$；

2) A、B端面对$\phi20^{+0.021}_{0}$孔的轴线H的垂直度公差为$\phi0.015mm$，表面粗糙度为$R_a1.6\mu m$；

3) 材料为HT300。

(2) 定位基准的选择

1) 以$\phi54$为粗基准，在一次装夹中车出A面、$\phi30^{+0.013}_{+0.002}$外圆及B面、$\phi20^{+0.021}_{0}$内孔；

2) 加工$\phi54$外圆及端面C时，可用$\phi30^{+0.013}_{+0.002}$外圆为精基准；

3) 加工3-$\phi5.5$孔时，用$\phi30^{+0.013}_{+0.002}$外圆和A端面为精基准；

4) 加工D面时，用$\phi20^{+0.021}_{0}$内孔、端面C和任一$\phi5.5$的孔为精基准。

(3) 加工路线的拟定

为保证套筒内外圆的同轴度要求和A，B端面对轴心线的垂直度，采用在一次装夹中先粗、精车端面A，$\phi30^{+0.013}_{+0.002}$外圆和B端面，再钻、扩、铰$\phi20^{+0.021}_{0}$的孔；车C面及$\phi54$外圆，钻、扩、铰内孔。

(4) 填写机械加工工艺过程卡片

定位套的机械加工工艺过程卡见表4-1。

表4-1 定位套机械加工工艺过程卡

工序号	工序名称	工序内容	定位基准	设备
1	铸造	铸造毛坯		
2	车	①粗精车端面A，$\phi30^{+0.013}_{+0.002}$外圆及端面B，保证长度尺寸26±0.1； ②钻孔$\phi12$，扩孔至$\phi19.8$，粗铰至$\phi19.94$，精铰至$\phi20^{+0.021}$； ③内外圆倒角1×45°； ④调头夹$\phi30^{+0.013}_{+0.002}$外圆，车端面C，保证长度6，车$\phi54$外圆至尺寸； ⑤内外圆倒角1×45°	外圆面	
3	划	3-$\phi5.5$孔线		
4	钻	钻3-$\phi5.5$孔，锪3-$\phi11$×90°沉孔	孔线	
5	钳	去毛刺		
6	检验			

4. 任务评价

任务完成以后，由学生对自己的成果进行讲解和交流，教师组织学生共同进行总结，根据任务完成情况，以及在项目组中的工作态度、参与程度、所起作用、合作能力等情况，对每个学生进行综合评价。任务实施检查与评价表见表4-2。

表 4-2　任务实施检查与评价表

<table>
<tr><th>序号</th><th colspan="2">检查内容</th><th>学生互评</th><th>教师评价</th><th>分值</th></tr>
<tr><td>1</td><td colspan="2">零件图样识别是否充分，结构工艺分析是否正确，是否形成记录</td><td></td><td></td><td>10%</td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="2">零件毛坯选择的可行性与正确性（毛坯图）</td><td></td><td></td><td>10%</td></tr>
<tr><td>3</td><td colspan="2">零件加工顺序制订的合理性与可行性（机械加工工艺过程卡）</td><td></td><td></td><td>30%</td></tr>
<tr><td>4</td><td colspan="2">重要工序内容确定的正确性与合理性（机械加工工序卡）</td><td></td><td></td><td>30%</td></tr>
<tr><td rowspan="4">5</td><td rowspan="4">职业素养</td><td>遵守时间：做到不迟到，不早退，中途不离开现场</td><td></td><td></td><td>5%</td></tr>
<tr><td>5S：理实一体现场是否符合 5S 管理要求，桌椅、参考资料是否按规定摆放，地面、门窗是否干净</td><td></td><td></td><td>5%</td></tr>
<tr><td>团结协作：组内是否配合良好；是否积极投入到本项目中积极完成本任务</td><td></td><td></td><td>5%</td></tr>
<tr><td>语言能力：是否积极回答问题；条理是否清晰</td><td></td><td></td><td>5%</td></tr>
<tr><td>总评</td><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

4.10　拓展项目

1. 任务案例

某液压缸如图 4-82 所示，材料为 45 钢，成批生产。

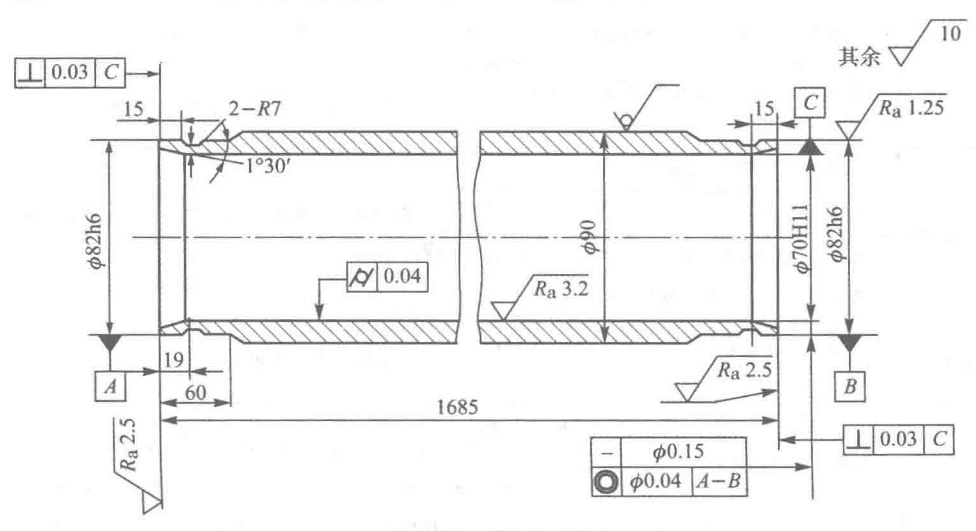


图 4-82　液压缸简图

2. 任务要求

编制液压缸的机械加工工艺过程卡。

3. 任务实施

(1) 液压缸加工工艺分析

该液压缸属长套筒类零件，与前述短套类零件在加工方法及工件安装方式上都有较大差别。该液压缸内孔与活塞相配，因此表面粗糙度、形状及位置精度要求都较高。毛坯可选用

无缝钢管，如果为铸件，其组织应紧密，无砂眼、针孔及疏松缺陷。必要时要用泵验漏。该液压缸为成批生产。

该零件长而壁薄，为保证内外圆的同轴度，加工外圆时参照空心主轴的装夹方法。即采用双顶尖顶孔口 1°30′的锥面或一头夹紧一头用中心架支承。加工内孔与一般深孔加工时的装夹方法相同，多采用夹一头，另一端用中心架托住外圆。孔的粗加工采用镗削，半精加工多采用铰削（浮动铰孔）。该液压缸内孔的表面质量要求很高，内孔精加工后需滚压。也有不少套筒类零件以精细镗、珩磨、研磨等精密加工作为最终工序。内孔经滚压后，尺寸误差在 0.01mm 以内，表面粗糙度为 R_a0.16μm 或更小，且表面经硬化后更为耐磨。但是目前对铸造液压缸尚未采用滚压工艺，原因是铸件表面的缺陷（如疏松、气孔、砂眼、硬度不均匀等），哪怕是很微小，都对滚压有很大影响，会导致滚压加工产生适得其反的效果。

(2) 液压缸的机械加工工艺过程

液压缸机械加工工艺过程见表 4-3。

表 4-3 液压缸加工工艺过程

序号	工序名称	工序内容	定位与夹紧
1	配料	无缝钢管切断	
2	车	①车 ϕ82mm 外圆到 ϕ88mm 及 M88×1.5mm 螺纹（工艺用）	三爪卡盘夹一端，大头顶尖顶另一端
		②车端面及倒角	三爪卡盘夹一端，搭中心架托 ϕ88mm 处
		调头车 ϕ82mm 外圆到 ϕ84mm	三爪卡盘夹一端，大头顶尖顶另一端
		车端面及倒角取总长 1686mm（留加工余量 1mm）	三爪卡盘夹一端，搭中心架托 ϕ88mm 处
3	深孔推镗	半精推镗孔到 ϕ68mm	一端用 M88×1.5mm 螺纹固定在夹具中，另一端搭中心架
		精推镗孔到 ϕ69.85mm	
		精铰（浮动镗刀镗孔）到 ϕ70±0.02mm，表面粗糙度值 R_a 为 2.5μm	
4	滚压孔	用滚压头滚压孔至 ϕ70 mm，表面粗糙度值 R_a 为 0.32μm	一端用螺纹固定在夹具中，另一端搭中心架
5	车	①车去工艺螺纹，车 ϕ82h6 到尺寸，割 $R7$ 槽	软爪夹一端，以孔定位顶另一端
		②镗内锥孔 1°30′及车端面	软爪夹一端，中心架托另一端（百分表找正孔）
		③调头，车 ϕ82h6 到尺寸，割 $R7$ 槽	软爪夹一端，顶另一端
		④镗内锥孔 1°30′及车端面	软爪夹一端，顶另一端

(3) 保证表面相互位置精度的方法

套类零件内外表面的同轴度以及端面与孔轴线的垂直度要求一般都较高，一般可用以下方法来满足：在一次安装中完成内外表面及端面的全部加工，这样可消除工件的安装误差并获得很高的相互位置精度。但由于工序比较集中，对尺寸较大的套筒安装不便，故多用于尺寸较小的轴套车削加工。主要表面的加工分在几次安装中进行（先加工孔），先加工孔至零件图尺寸，然后以孔为精基准加工外圆。由于使用的夹具（通常为心轴）结构简单，而且制造和安装误差较小，因此可保证较高的相互位置精度，在套筒类零件加工中应用较多。主要表面的加工分在几次安装中进行（先加工外圆），先加工外圆至零件图尺寸，然后以外圆为精基准完成内孔的全部加工。该方法工件装夹迅速可靠，但一般卡盘安装误差较大，使得加工后工件的相互位置精度较低。如果欲使同轴度误差较小，则须采用定心精度较高的夹具，如弹性膜片卡盘，液性塑料夹头、经过修磨的三爪自定心卡盘和软爪等。

(4) 防止套类零件变形的工艺措施

套类零件的结构特点是孔的壁厚较薄，薄壁套类零件在加工过程中，常因夹紧力. 切削力和热变形的影响而引起变形。为防止变形常采取一些工艺措施：

1) 将粗、精加工分开进行。为减少切削力和切削热的影响，使粗加工产生的变形在精加工中得以纠正。

2) 减少夹紧力的影响。

在工艺上采取以下措施减少夹紧力的影响：

改变夹紧力的方向，将径向夹紧改为轴向夹紧。采用径向夹紧时，夹紧力不应集中在工件的某一径向截面上，而应使其分布在较大的面积上，以减小工件单位面积上所承受的夹紧力。如可将工件安装在一个适当厚度的开口圆环中，在连同此环一起夹紧。也可采用增大接触面积的特殊卡爪。夹紧力的位置宜选在零件刚性较强的部位，以改善在夹紧力作用下薄壁零件的变形。在工件上制出加强刚性的工艺凸台或工艺螺纹以减少夹紧变形，加工时用特殊结构的卡爪夹紧，加工终了时将凸边切去。如表 4-4 工序 2 先车出 M88×1.5 的螺纹供后续工序装夹时使用。在工序 3 中利用该工艺螺纹将工件固定在夹具中，加工完成后，在工序 5 车去该工艺螺纹。

(5) 减小切削力对变形的影响

增大刀具主偏角和主前角，使加工时刀刃锋利，减少径向切削力。热处理放在粗加工和精加工之间这样安排可减少热处理变形的影响。套类零件热处理后一般会产生较大变形，在精加工时可得到纠正，但要注意适当加大精加工的余量。

习　题

1. 一般套类零件的内孔表面加工方法有哪些？如何选择？
2. 孔的精加工方法有哪些？比较其应用场合和特点。
3. 麻花钻的顶角一般为多少度？如果顶角不对，麻花钻的切削刃会产生什么变化？
4. 车孔的关键技术问题是什么？
5. 怎样提高内孔车刀的刚性？
6. 怎样选择铰刀的尺寸？

7. 保证套类工件的同轴度、垂直度有哪些方法?
8. 常用的心轴有哪几种?各适用于什么场合?
9. 怎样检验工件的径向和端面的圆跳动?
10. 铰孔时,孔口产生喇叭形是什么原因?
11. 铰孔时,孔的表面粗糙度大是什么原因?
12. 编写如图 4-83 所示的车床尾座的机械加工工艺过程。生产类型为大批量。

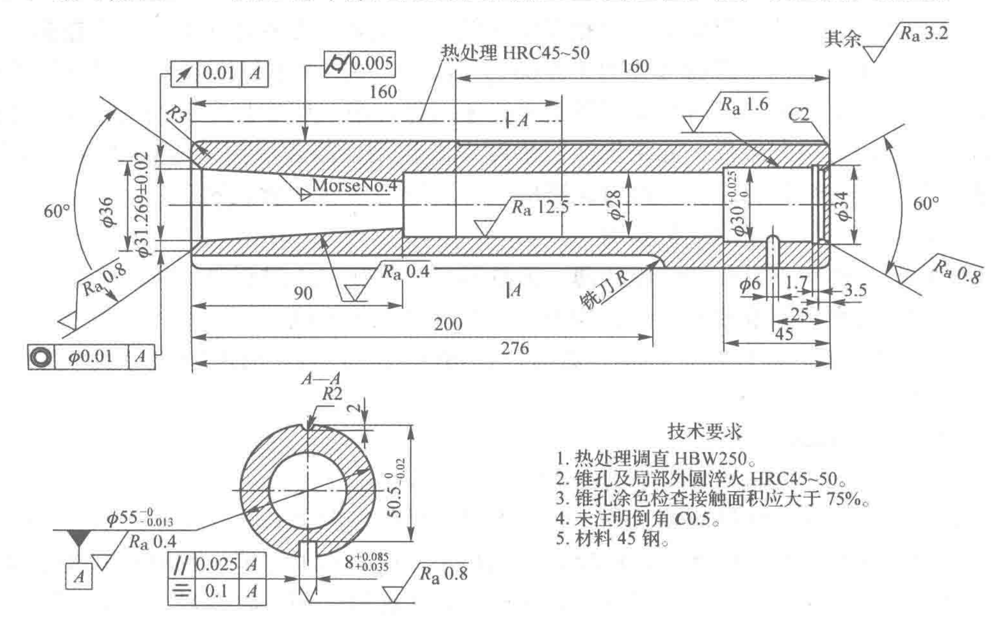


图 4-83 车床尾座简图

项目五　箱体类零件加工工艺

【知识点】

- 了解一般箱体类零件的功用及加工特点，技术要求；
- 了解箱体类零件的材料、毛坯及热处理；
- 掌握箱体类零件的加工方法、加工设备与刀具；
- 掌握箱体类零件工艺的分析方法。

【技能点】

- 具有箱体类零件工艺性分析能力；
- 掌握箱体类零件毛坯的选择方法；
- 具有编制简单箱体类零件工艺过程卡的能力；
- 初步具备较复杂箱体类零件的工艺路线编写能力。

5.1　项目导入

1. 任务案例

工作对象：8E160C-J 中间泵壳，零件图如图 5-1 所示，现为中、小批量生产。

2. 任务要求

编制中间泵壳零件的机械加工工艺过程卡、机械加工工序卡：在条件允许的情况下，由企业操作工人按照学生编制的工艺规程操作机床加工零件，由生产车间工艺员验证工艺的合理性。

3. 任务引导

1）仔细阅读中间泵壳零件图，回顾 2.3 节知识点——零件的工艺性分析，检查零件图的完整性和正确性。根据实际制造能力分析审查零件的结构、尺寸精度、形位精度、表面粗糙度、材料及热处理等技术要求是否合理，是否便于加工以及加工的经济性。根据零件结构工艺性的一般原则，判断该零件的结构工艺性是否良好？如果结构工艺性不好，如何改进？

2）回顾 2.4 节知识点——毛坯的选择，如何选择中间泵壳零件毛坯？如何确定毛坯尺寸？

3）箱体类零件的功用、结构特点、技术要求、材料、毛坯及热处理要求有哪些？

4）箱体类零件平面的加工方法有哪些？如何选择？

5）箱体类零件平面的加工设备有哪些？如何选择？

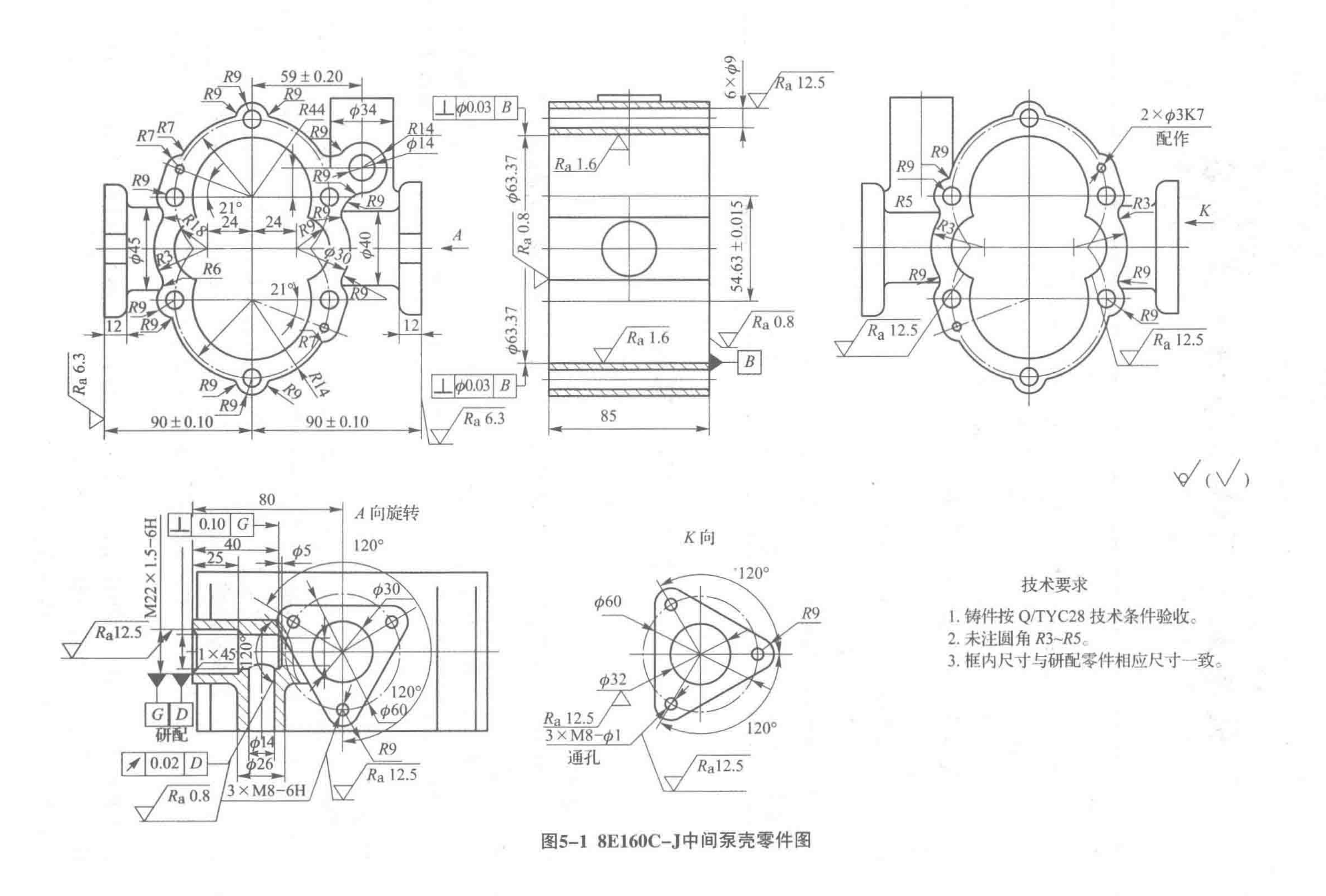


图5–1 8E160C–J中间泵壳零件图

6）箱体类零件平面的加工刀具有哪些？如何选择？

7）如何保证箱体类零件孔系精度？

8）箱体类零件的主要检验项目有哪些？

9）如何检验箱体类零件孔系位置精度及孔距精度？

10）企业生产参观实习。

• 生产现场加工哪些箱体类零件？批量如何？采用什么毛坯？

• 生产现场各种箱体类零件加工工艺有何特点？一般使用什么机床加工？采用何种刀具？使用哪种量具测量？工件如何装夹？

5.2 箱体类零件工艺分析

5.2.1 箱体类零件的功用和结构特点

箱体类零件是机器或部件的基础零件，其主要作用是将机器或部件中的轴、套和齿轮等相关零件组成一个整体，并使它们之间保持正确的位置关系，按照一定的传动关系协调地传递运动或动力。因此，箱体类零件的加工质量将直接影响机器或部件的精度、性能和使用寿命。

常见的箱体类零件有机床主轴箱、机床进给箱、变速箱、减速箱、机座和发动机缸体等。根据箱体结构形式不同，箱体类零件可分为整体式和分离式两大类。整体式箱体采用整体铸造、整体加工，加工较困难，但装配精度高；分离式箱体各部分分别制造，便于加工和装配，但增加了装配工作量。

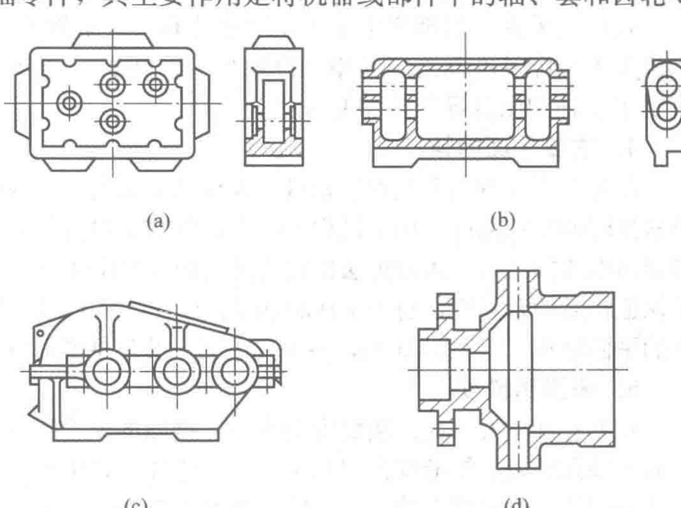


图 5-2 几种常见的箱体类零件结构简图

(a) 组合机床主轴；(b) 车床进给箱；(c) 分离式减速箱；(d) 泵壳

图 5-2 所示为几种常见结构形式的箱体类零件。从图中可以看出，箱体类零件虽然形状各异，但其结构仍有以下主要特点：①形状复杂，内有空腔；②一般体积较大；③壁薄且不均匀；④有若干精度要求较高的孔系和平面；⑤有许多精度要求一般的紧固螺纹孔或通孔、油孔、油槽等。因此，箱体类零件不仅需要加工的部位较多，加工难度也较大，其机械加工工时占整个产品加工量的 15%～20%。

5.2.2 箱体类零件的技术要求

箱体类零件的技术要求主要有以下几个方面。

1. 孔径精度

孔径的尺寸误差和几何形状误差会影响轴承与孔的配合精度。例如，孔径过大，配合过松，会使主轴回转轴线不稳定，并降低支承刚度，从而产生振动和噪声；孔径过小，会使配合偏紧，将因轴承外环变形而影响主轴的回转精度和轴承的寿命；轴承孔圆度误差较大，也会使轴承外环变形而引起主轴径向圆跳动。主轴孔的尺寸公差等级为IT6，一般支承孔为IT8～IT7。孔的几何形状精度未作规定时，一般控制在尺寸公差的1/2范围内即可。

2. 孔与孔的位置精度

同一轴线上各孔的同轴度误差和孔端面对轴线的垂直度误差，会使轴和轴承装配到箱体内出现歪斜，造成主轴径向圆跳动和轴向窜动，同时也使温升增加，轴承磨损加剧。一般各轴孔间的中心距公差为±0.05 mm，同轴上各孔的同轴度约为最小孔尺寸公差的1/2。孔系之间的平行度误差会影响齿轮的啮合质量。

3. 孔和平面的位置精度

箱体类零件一般都规定了主要轴承孔和安装基面的平行度要求，它们决定了主要传动轴和机器上装配基准面之间的相互位置关系。例如，主要孔和主轴箱安装基面的平行度要求，决定了主轴和床身导轨的相互位置关系。

4. 主要平面的精度

箱体类零件的装配基面通常既是设计基准又是工艺基准，其平面度会直接影响主轴箱与床身联接时的接触刚度，加工过程中作为定位基面则会影响主要孔的加工精度。因此，规定底面和导向面必须平直，用涂色法检查接触面积或单位面积上的接触点数来衡量平面度的大小。为了保证箱盖的密封性，防止工作时润滑油泄出，还规定了顶面的平面度要求。一般箱体主要平面的平面度在0.1～0.03mm，各主要平面对装配基准面垂直度为0.1/300。

5. 表面粗糙度

重要孔和主要平面的粗糙度会影响连接面的配合性质或接触刚度，所以都有严格的要求。一般主轴孔的表面粗糙度为$R_a0.4\mu m$，其他各纵向孔为$R_a1.6\mu m$，孔的内端面为$R_a3.2\mu m$；装配基准面和定位基准面的表面粗糙度为$R_a2.5\sim0.63\mu m$，其他平面为$R_a10\sim2.5\mu m$。

5.2.3 箱体类零件的材料、毛坯及热处理

箱体类零件一般都有复杂的内腔结构，应选用易于成型的材料和制造方法。灰铸铁成型容易、切削性能好、价格低廉，并且具有良好的耐磨性和减振性，因此，箱体类零件的材料常选用HT200～400的各种牌号的灰铸铁，其中HT200最为常用，例如CA6140车床主轴箱箱体材料便是，而对于坐标镗床主轴箱这样较为精密的箱体零件则选用耐磨铸铁。有些负荷较大的箱体采用铸钢件，有些简易箱体为了缩短毛坯制造的周期而采用钢板焊接结构。在特定条件下，为了减轻质量，可采用铝镁合金或其他铝合金材料，如航空发动机箱体等。

铸件毛坯的精度和加工余量是根据生产批量而定的。单件小批量生产时，一般采用木模手工造型，毛坯精度低，加工余量大，其平面余量一般为7～12mm，孔在半径上的余量为8～14mm。大批大量生产时，常采用金属模机器造型，毛坯精度较高，加工余量可适当减

少，平面余量为5～10mm，孔在半径上的余量为7～12mm。为了减少加工余量，单件小批生产直径大于50mm的孔或成批生产直径大于30mm的孔时，一般都要在毛坯上铸出预制孔。此外，在毛坯铸造时，应防止砂眼和气孔等铸造缺陷的产生；还应尽量使箱体零件的壁厚均匀，以减少毛坯制造时产生的残余应力。

由于箱体零件结构复杂，壁厚不均，在铸造时会产生较大的残余应力。为了保证箱体加工精度的稳定性，在毛坯铸造之后需安排一次人工时效。人工时效的工艺规范为，加热到500～550℃，保温4～6h，冷却速度小于或等于30℃/h，出炉温度小于或等于200℃。箱体的人工时效方法除常用的加热保温外，还可采用振动时效进行处理。

5.2.4 箱体类零件的加工工艺过程分析

1. 箱体类零件的加工工艺过程

箱体类零件的机械加工工艺规程一般为铸造毛坯—时效—划线—粗加工主要平面—粗加工支承孔—时效—精加工主要平面—精加工支承孔—加工其他次要表面—检验。

2. 定位基准的选择

（1）粗基准的选择

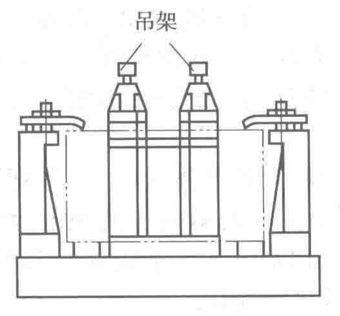
粗基准的作用主要是保证各加工面的余量均匀合理，以及加工面与非加工面之间具有准确的相互的位置关系。箱体类零件一般以其上面的重要孔（如主轴箱上的主轴孔）作为粗基准，这样不仅可以较好地保证重要孔及其他各轴孔的加工余量均匀，还能较好地保证各轴孔轴心线与箱体非加工面之间的相互位置。箱体中往往装有齿轮等传动件，它们与不加工的内壁之间的间隙较小，如果加工出的轴承孔端面与箱体内壁之间的距离尺寸相差太大，就有可能使齿轮在安装时与箱体内壁相碰。从这一要求出发，应选内壁为粗基准，但这将使夹具结构变得十分复杂。实际生产中考虑到铸造时内壁与主要孔都是同一个泥心浇注的，因此常以孔为主要粗基准，限制四个自由度，而辅之以内腔或其他毛坯孔为次要基准面，以达到完全定位的目的。

（2）精基准的选择

为保证箱体上各主要加工面的加工余量均匀，满足孔与孔、孔与平面以及平面之间的尺寸精度和相互位置精度要求，精基准选择时应遵循“基准重合”和“基准统一”原则，即考虑精基准时除要求定位基准与设计基准重合外，具有相互位置精度要求的加工表面应尽量使用同一基准定位加工，以提高产品加工质量，方便夹具的设计与制造，降低生产成本。

箱体加工精基准的选择还与生产批量大小有关，中小批生产常采用装配基面做定位基准。箱体的装配基面通常是零件上各项主要技术要求的设计基准，以此作为定位基准符合基准重合和基准统一原则，并且在加工时一般箱体开口朝上，所以安装调整刀具、更换导向套、测量孔径尺寸、观察加工情况和加注切削液等都很方便。

但是，当加工箱体中间壁上的孔时，为了提高刀具系统的刚度，需要在箱体内部相应的部位设置刀杆的导向支承（即吊架），如图5-3所示。由于箱体底部是封闭的，吊架只能从箱体顶面的开口处伸入箱体内，每加工一件需装卸一次，加工辅助时间较长，不易实现自动化；另外，吊架与镗模之间虽有定位销定位，但吊架刚性差，制造安装精度较低，影响产品加工精度，因此这种定位方式只适用于中小批生产或中间壁上无孔的箱体。



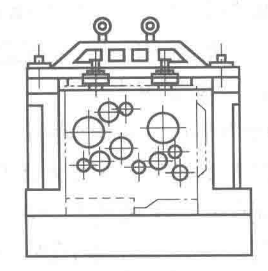
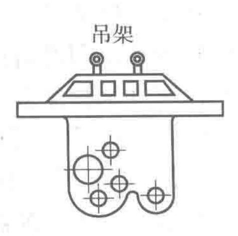



图 5-3　吊架式镗模夹具

大批量生产时一般采用一面两孔作定位基准。例如，大批量生产时主轴箱常以顶面和两定位销孔为精基准，如图 5-4 所示。这种定位方式是加工时箱体口朝下，中间导向支架可固定在夹具上。由于简化了夹具结构，提高了夹具的刚度，同时工件的装卸也比较方便，因而提高了孔系的加工质量和劳动生产率。

这种定位方式的不足之处在于定位基准与设计基准不重合，产生了基准不重合误差。为了保证箱体的加工精度，必须提高作为定位基准的箱体顶面和两定位销孔的加工精度。另外，由于箱口朝下，加工时不便于观察各表面的加工情况，因此，不能及时发现毛坯是否有砂眼、气孔等缺陷，而且加工中不便于测量和调刀。所以，用箱体顶面和两定位销孔作精基准加工时，必须采用定径刀具（扩孔钻和绞刀等）。

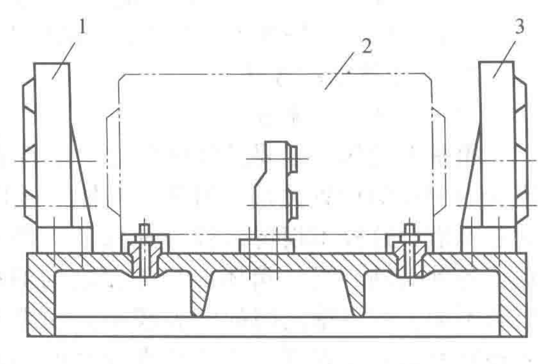


图 5-4　箱体以一面两孔定位

1—后支架；2—工件；3—前支架

上述两种方案的对比分析，仅仅是针对类似床头箱而言，许多其他形式的箱体，采用一面两孔的定位方式，上面所提及的问题也不一定存在。实际生产中，一面两孔的定位方式在各种箱体加工中应用十分广泛。因为这种定位方式很简便地限制了工件六个自由度，定位稳定可靠；在一次安装下，可以加工除定位以外的所有五个面上的孔或平面，也可以作为从粗加工到精加工的大部分工序的定位基准，实现“基准统一”；此外，这种定位方式夹紧方便，工件的夹紧变形小；易于实现自动定位和自动夹紧。因此，在组合机床与自动线上加工箱体时，多采用这种定位方式。

由以上分析可知，箱体精基准的选择有两种方案：一是以 3 个平面为精基准（主要定位基面为装配基面）；另一是以一面两孔为精基准。这两种定位方式各有优缺点，实际生产中的选用与生产类型有很大的关系。中小批生产时，通常按“基准统一”的原则，尽可能使定位基准与设计基准重合，即一般选择设计基准作为统一的定位基准；大批大量生产时，优先考虑的是如何稳定加工质量和提高生产率，不过分地强调基准重合问题，一般多用典型的一面两孔作为统一的定位基准，由此而引起的基准不重合误差，可采用适当的工艺措施去解决。

3. 拟定箱体类零件加工工艺的原则

(1) 先面后孔

箱体类零件的加工按照先加工平面，后加工孔的顺序进行。因为箱体上的主要平面也是装配基面，以加工好的平面定位加工支承孔，可使定位基准、设计基准和装配基准重合，从而消除因基准不重合而引起的误差。另外，箱体上的孔大多分布在箱体外壁平面上，先加工外壁平面可以切去铸件表面的凹凸不平以及夹砂等缺陷，在后续的孔加工时可减少钻头引偏和崩刃现象，对刀和调整也比较方便。

(2) 粗精分开、先粗后精

箱体类零件形状结构复杂，壁厚不均，主要平面及孔系加工精度高，一般应将粗、精加工工序分阶段进行，主要平面和各支承孔先进行粗加工，后进行精加工。这样可以消除由粗加工所造成的内应力、切削力、夹紧力等因素对加工精度的不利影响；可以合理选用设备，充分发挥设备的潜能和优势。但是，粗、精加工分开，会使机床、夹具的数量及工件安装次数增加，导致生产成本提高。因此，实际生产中，对于单件、小批量生产或精度要求不高的箱体，常将粗、精加工在同一台机床上完成，但必须采取相应措施，尽量减少加工过程中的变形。例如粗加工后松开工件，让工件充分冷却，然后用较小的夹紧力重新夹紧，以较小的切削用量和多次走刀进行精加工。

(3) 工序的集中与分散

箱体零件上相互位置要求较高的孔系和平面，应尽量集中在同一工序中加工，以保证其相互位置要求和减少装夹次数。工序相对集中还可以减少工序数目，缩短工艺路线；减少设备数量和生产面积；有利于采用高生产率的专用设备和工艺装备，如采用多刀多刃、多轴机床、数控机床和加工中心等，从而大大提高生产率。工序分散可以选用较为简单的设备和工艺装备，对工人的技术水平要求也较低；可以采用有利的切削用量，减少机动时间；容易适应生产产品的变换。因此，制定工艺路线时应综合考虑生产类型、生产条件、工件结构特点和技术要求等因素，使工序适当地集中，合理地分散。

(4) 合理安排热处理工序

普通精度的箱体零件，一般在毛坯铸造之后安排一次人工时效即可。对于一些高精度箱体或形状特别复杂的箱体，应在粗加工之后再安排一次人工时效，以消除粗加工产生的残余应力，进一步提高箱体尺寸的稳定性。

(5) 设备选择

单件小批量生产通常在通用机床上进行，产品的加工质量主要取决于基础操作者的技术水平，对于具有较多加工表面的复杂箱体，可采用数控机床加工以提高生产效率，保证产品质量。大批量的箱体加工广泛采用专用机床，如多轴龙门铣床、组合磨床等，各主要孔的加工采用多工位组合机床、专用镗床等，专用夹具使用也较多，这就大大地提高了生产率。

5.3 箱体类零件加工方法

5.3.1 平面加工

箱体零件主要是一些平面和孔的加工。箱体平面的粗加工及半精加工常采用刨削或铣削，精加工则采用磨削或刮研。其中刨削生产率低，多用于中小批生产。铣削生产率比刨削

高，多用于中批以上生产。当生产批量较大时，还可采用各种专用的组合铣床对箱体各平面进行多刀、多面同时铣削；尺寸较大的箱体，为了提高箱体平面加工的生产率也可在多轴龙门铣床上进行组合铣削，如图 5-5（a）所示。箱体平面的精加工，单件小批生产时，除一些高精度的箱体仍需采用手工刮研外，一般多以精刨代替传统的手工刮研；当生产批量大而精度又较高时，多采用磨削。为了提高生产效率和平面间的相互位置精度，可采用专用磨床进行组合磨削，如图 5-5（b）所示。

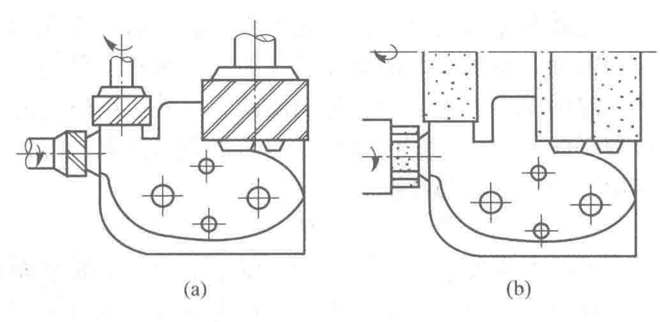


图 5-5　箱体平面的组合铣削与磨削

（a）组合铣削；（b）组合磨削

1. 铣削加工

铣削是平面加工应用最广泛的切削加工方法之一，铣削时铣刀的旋转运动为主运动，工件的直线运动为进给运动。铣削加工的工艺范围广，可以加工各种平面、台肩、沟槽、成形表面及切断等，如图 5-6 所示。铣削时同时参加切削的刀齿数多，生产效率较高，加工质量中等。粗铣的加工精度可达 IT13～IT11，表面粗糙度 R_a 为 50～12.5μm，精铣削的加工精度可达 IT8～IT7，表面粗糙度 R_a 值可达 6.3～1.6μm。但是铣削是断续切削，铣削过程不平稳，同时刀齿还经受时冷时热的热应力冲击，容易出现裂纹和崩刃。

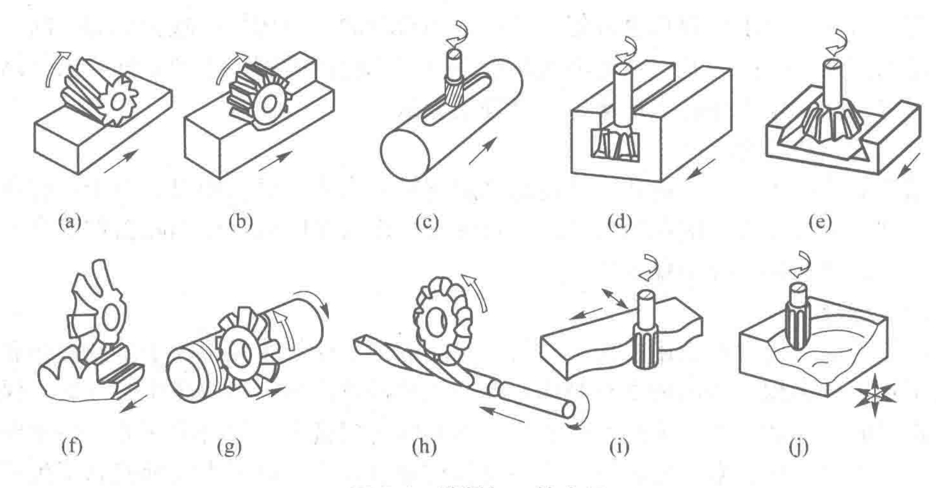


图 5-6　铣削加工的应用

（a）铣平面；（b）铣台阶；（c）铣键槽；（d）铣 T 形槽；（e）铣燕尾槽；

（f）铣齿槽；（g）铣螺纹；（h）铣螺旋槽；（i）铣二维曲面；（j）铣三维曲面

铣刀刀齿在刀具上的分布有两种形式，一种是分布在刀具的圆周表面上，一种是分布在刀具的端面上。对应的分别是圆周铣和端铣。

（1）周铣

周铣是用铣刀圆周上的切削刃来铣削工件，铣刀的回转轴线与被加工表面平行，如图 5-7（a）所示。周铣适于在中、小批量生产中铣削狭长的平面、键槽及某些曲面。周铣有顺铣和逆铣两种方式。

1）逆铣。铣削时，在铣刀和工件接触处，铣刀的旋转方向与工件的进给方向相反，称为逆铣，如图 5-8（a）所示。铣削过程中，在刀齿切入工件前，刀齿要在加工面上滑移一段距离，从而加剧了刀齿的磨损，增加工件表层硬化程度，并增大加工表面的粗糙度。逆铣时有把工件向上挑起的切削垂直分力，影响工件夹紧，需加大夹紧力。但铣削时，水平切削分力有助于丝杠与螺母贴紧，消除丝杠与螺母之间的间隙，使工作台进给运动比较平稳。

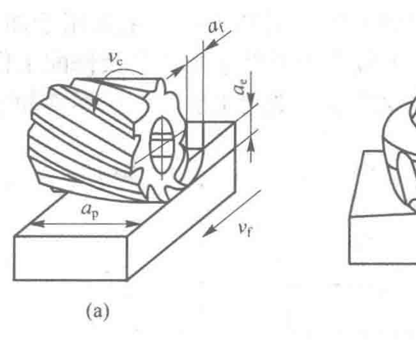


图 5-7　铣削的两种方式

（a）周铣；（b）端铣

2）顺铣。铣削时，在铣刀和工件接触处，铣刀的旋转方向与工件进给方向相同时称为顺铣，如图 5-8（b）所示。顺铣过程中，刀齿切入时没有滑移现象，刀具使用寿命比逆铣时长，已加工表面质量较高。顺铣时垂直切削分力有助于夹紧工件，而水平切削分力与工件台移动方向一致，当这一切削分力足够大时，就会在螺纹传动副侧隙范围内使工作台向前窜动并短暂停留，严重时甚至引起“啃刀”和“打刀”现象。因此，如采用顺铣，必须要求铣床工作台进给丝杠螺母副有消除侧向间隙机构。

综上所述，顺铣有利于提高刀具耐用度和工件夹持的稳固性，从而有利于提高加工质量。在切削用量较小（如精铣）、工作表面质量较好，或机床有消除螺纹传动副侧隙装置时，则采用顺铣为宜。另外，对不易夹牢以及薄而长的工件，也常用顺铣。一般情况下，特别是加工硬度较高的工件时，则最好采用逆铣。

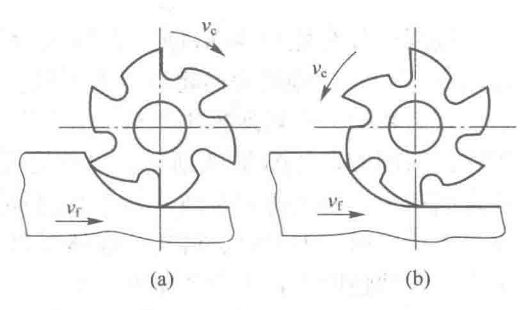


图 5-8　逆铣与顺铣

（a）逆铣；（b）顺铣

（2）端铣

端铣是用铣刀端面上的切削刃来铣削工件，铣刀的回转轴线与被加工表面垂直，如图 5-7（b）所示。端铣适于在大批量生产中铣削宽大平面。端铣分为对称铣削和不对称铣削，不对称铣削还分为顺铣和逆铣，如图 5-9 所示。

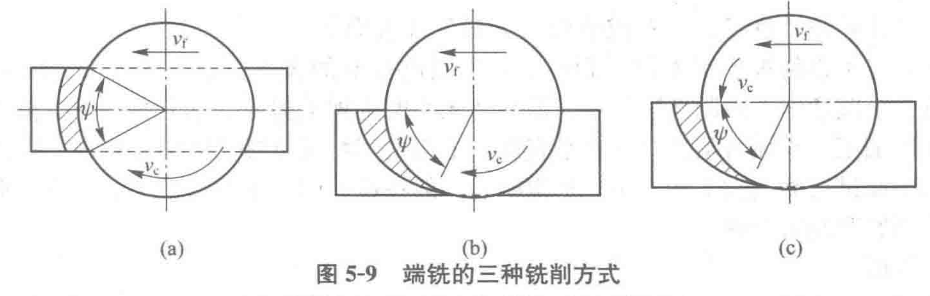


图 5-9　端铣的三种铣削方式

（a）对称铣削；（b）不对称逆铣；（c）不对称顺铣

2. 平面刨削

刨削是平面加工的方法之一，它是以刨刀相对工件的往复直线运动与工作台（或刀架）

的间歇进给运动实现切削加工的。主要用于加工平面、斜面、沟槽和成形表面，如图 5-10 所示。刨削加工应用于单件小批生产及修配工作中，中、小型零件的平面加工一般多在牛头刨床上进行，龙门刨床则用来加工大型零件的平面以及同时加工多个中型工件的平面。

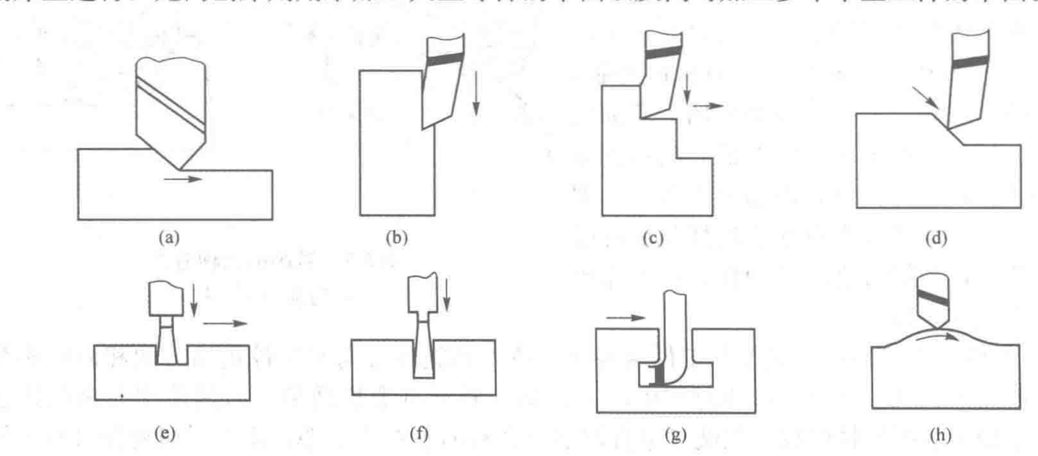


图 5-10　刨削的工艺范围

(a) 刨平面；(b) 刨垂直面；(c) 刨台阶；(d) 刨斜面；
(e) 刨宽槽；(f) 刨窄槽；(g) 刨 T 形槽；(h) 刨曲面

刨削可分为粗刨和精刨。粗刨的表面粗糙度 R_a 为 50～12.5μm，尺寸公差等级为 IT12～IT14；精刨的表面粗糙度 R_a 可达 3.2～1.6μm，尺寸公差等级为 IT7～IT9。

宽刃精刨是在普通精刨基础上，使用高精度龙门刨床和宽刃精刨刀，如图 5-11 所示，以低切速和大进给量在工件表面切去一层极薄的金属。对于接触面积较大的定位平面与支承平面，如导轨、机架、壳体零件上的平面的刮研工作，劳动强度大，生产效率低，对工人的技术水平要求高，宽刃精刨工艺可以减少甚至完全取代磨削、刮研工作，在机床制造行业中获得了广泛的应用，能有效地提高生产率。宽刃精刨加工的直线度可达到 0.02mm/m，表面粗糙度 R_a 可达 0.8～0.4μm。

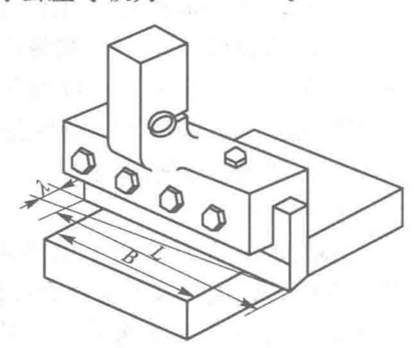


图 5-11　宽刃精刨刀

3. 平面磨削

磨削是用砂轮、砂带、油石或研磨料等对工件表面的切削加工，它可以使被加工零件得到高的加工精度和好的表面质量。磨削加工的适应性很广，可分为外圆磨削、内圆磨削、平面磨削及无心磨等加工类型。本节主要介绍箱体类零件的平面磨削加工。平面磨削是对一些平直度、平面之间相互位置精度要求较高、表面粗糙度要求小的平面进行磨削加工的方法，平面磨削一般在铣、刨、车削的基础上进行。平面磨削的方法有周磨和端磨两种。

(1) 周磨

周磨平面（见图 5-12（a））是指用砂轮的圆周面来磨削平面。砂轮和工件的接触面小，发热量小，磨削区的散热、排屑条件好，砂轮磨损较为均匀，可以获得较高的精度和表面质量。但在生产效率低，常用于单件小批生产中加工精度要求较高的平面，能获得高的精度和

较小的表面粗糙度。

(2) 端磨

端磨（见图 5-12（b））是用砂轮的端面来磨削平面，端磨时，磨头伸出短，刚性好，可采用较大的磨削用量，生产效率高。但砂轮与工件接触面积大，发热多，散热和冷却较困难，加一上砂轮端面各点的圆周线速度不同，磨损不均匀，故精度较低。一般在大批量生产中，用端磨代替刨削和铣削进行粗加工。

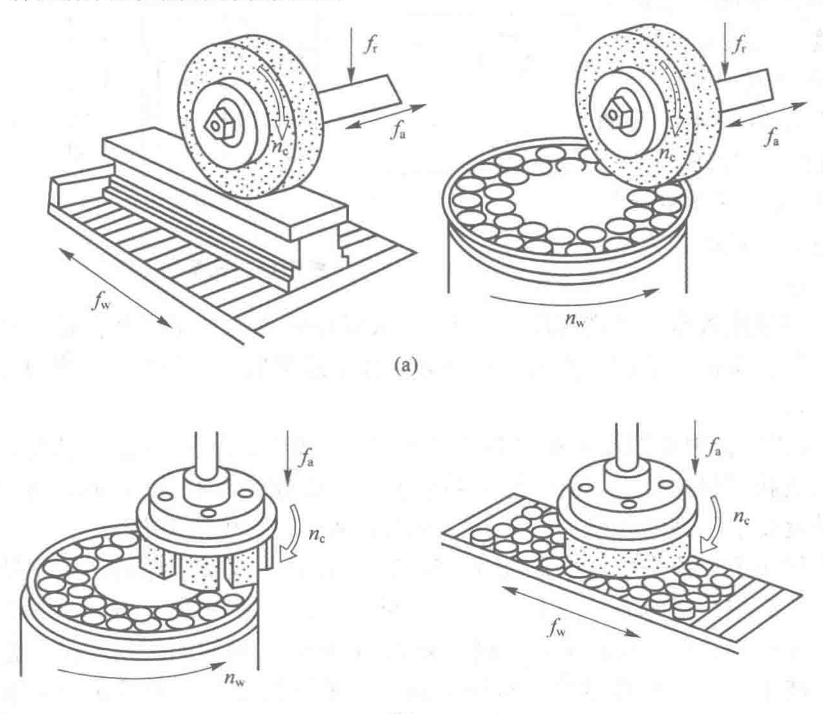


图 5-12　平面磨削的两种方式

(a) 周磨；(b) 端磨

4. 平面的光整加工

(1) 平面刮研

平面刮研是利用刮刀在工件上刮去很薄一层金属的光整加工方法，常在精刨的基础上进行。刮研可以获得很高的表面质量。表面粗糙度 R_a 可达1.6～0.4μm，平面的直线度可达0.01mm/m，甚至可以达到 0.005～0.002 5mm/m。刮研既可提高表面的配合精度，又能在两平面间形成储油空隙，以减少摩擦，提高工件的耐磨性，还能使工件表面美观。

刮研劳动强度大，操作技术要求高，生产率低，故多用于单件小批量生产及修理车间，加工未淬火的要求高的固定连接面（如车床床头箱底面）、导向面（如各种导轨面）及大型精密平板和直尺等。

(2) 平面研磨

平面研磨也是平面的光整加工方法之一，一般在磨削之后进行。研磨后两平面的尺寸精度可达 IT3～IT5，表面粗糙度 R_a 可达 0.1～0.008μm，直线度可达 0.005mm/m。平面研磨主要用来加工小型精密平板、直尺、块规以及其他精密零件的平面。单件小批量生产中常采用手工研磨，大批量生产则常用机械研磨。

5.3.2 孔系加工

孔系是指箱体类零件上一系列具有相互位置精度要求的轴承孔的集合，可分为平行孔系、同轴孔系和交叉孔系三类，如图 5-13 所示。各孔径的尺寸精度由孔加工刀具保证，而如何保证各孔之间或孔与其他表面间的相互位置精度，是孔系加工中的关键技术。

下面介绍几种保证箱体类零件孔系精度的加工方法。

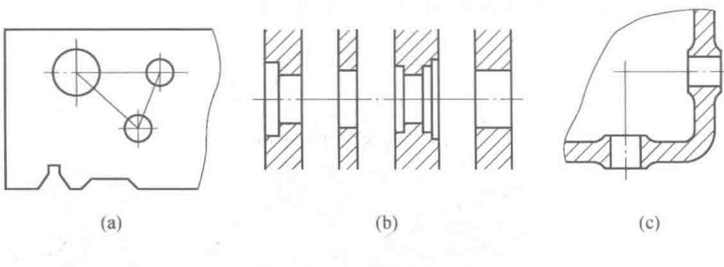


图 5-13 孔系的分类

1. 平行孔系的加工

平行孔系是指既要求孔的轴线互相平行，又要求保证孔距精度的一些孔。下面将介绍保证平行孔系孔距精度的方法。

（1）找正法

找正法是在通用机床上（铣镗床、铣床），依据操作者的技术，并借助一些辅助工具来找正要加工孔的正确位置的加工方法。这种方法加工效率低，一般只适于单件小批生产，常见的有以下几种。

1）划线找正法。根据图样要求在毛坯或半成品上划出界线作为加工依据，然后按线找正加工。划线法找正误差较大，所以加工精度低，一般在±0.3～0.5mm，适合于单件小批生产中孔距精度要求不高的孔系加工。下面介绍主轴箱的划线找正方法。

首先将箱体用千斤顶安放在平台上（见图 5-14（a）），调整千斤顶，使主轴孔 I 和 *A* 面与台面平行，*D* 面与台面垂直，再根据毛坯主轴孔划出水平轴线 I—I，在 4 个面上均要划出，作为第一校正线。I—I 线确定后，同时划出 *A* 面和 *C* 面的加工线。接着把 *D* 面置于 3 个千斤顶上，使 I—I 线与台面垂直，按照上述同样的方法划出主轴孔的垂直轴线 Ⅱ—Ⅱ 作

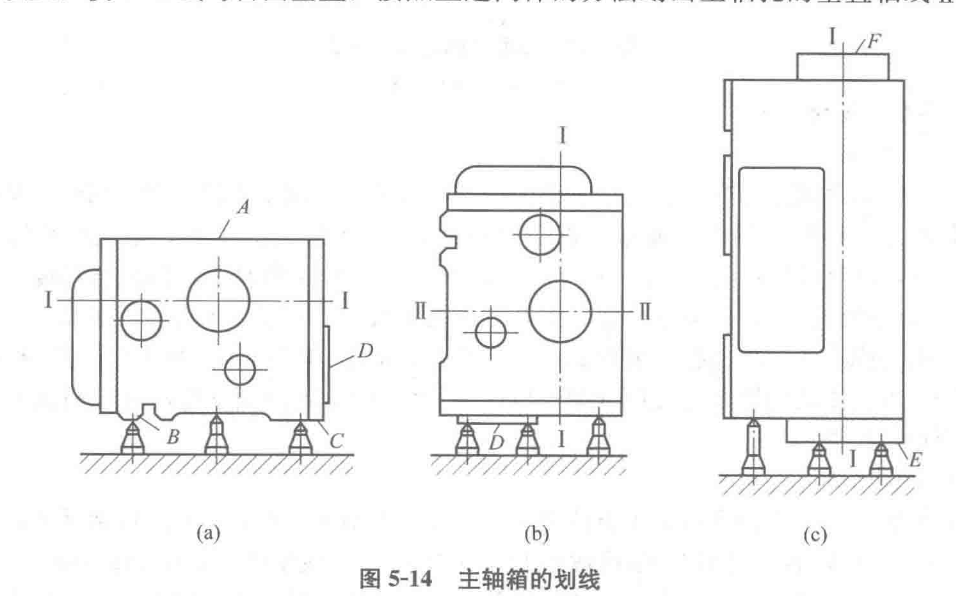


图 5-14 主轴箱的划线

（a）水平；（b）侧面；（c）划高度

为第二校正线（见图 5-14（b)），也在 4 个面上均划出；然后依据Ⅱ—Ⅱ线划出 D 面加工线。最后再将箱体翻转 90°（见图 5-14（c)），将 E 面置于千斤顶上，使Ⅰ—Ⅰ线与Ⅱ—Ⅱ线与台面垂直，再根据凸台高度尺寸，先划出 F 面，然后再划出 E 面加工线。划线找正花费时间长、生产率低，而且加工出的孔距精度也较低，一般在0.5～1mm范围。为提高划线找正的精度，加工中往往需结合试切法同时进行。

2）心轴和量规找正法。将精密心轴插入镗床主轴孔内（或直接利用镗床主轴），然后根据孔和定位基面的距离用块规、塞尺校正主轴位置，镗第 1 排孔，如图 5-15（a）所示。镗第 2 排孔时，分别在第 1 排孔和主轴中插入心轴，然后采用同样方法确定镗第 2 排孔时的主轴位置，如图 5-15（b）所示。采用这种方法孔距精度可达到±（0.03～0.05）mm。

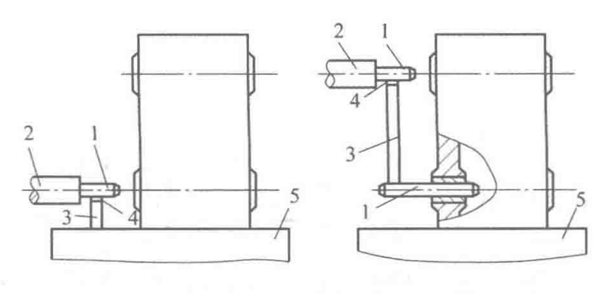


图 5-15 用心轴和量规找正

(a) 第一工位；(b) 第二工位

1—心轴；2—镗床主轴；3—量规；4—塞尺；5—镗床工作台

3）样板校正法。如图 5-16 所示，用 10～20mm 厚的钢板制成样板 1，样板上的孔距精度较箱体孔系的孔距精度高（一般为±（0.01～0.03）mm)，孔径较工件的孔径大，以便于镗杆通过。样板上孔的直径精度要求不高，但要有较高的形状精度和较小的表面粗糙度值。找正时将样板装在垂直于各孔的端面上（或固定在机床工作台上），在机床主轴上装一千分表 2，按样板找正主轴，找正后即可换上镗刀加工。此方法找正方便，工艺装备不太复杂。一般样板的成本仅为镗模成本的 1/7～1/9，孔距精度可达±0.05mm。在单件小批生产加工较大箱体使用镗模不经济时，常用此法。

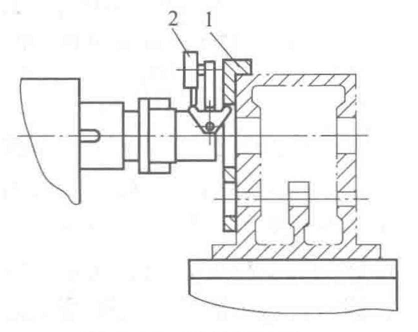
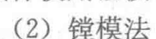


图 5-16 样板找正法

1—样板；2—千分表

（2）镗模法



在成批生产中，广泛采用镗模加工孔系，如图 5-17 所示。工件 5 装夹在镗模上，镗杆 4 被支承在镗模的导套 6 内，导套的位置决定了镗杆的位置，装在镗杆上的镗刀 3 将工件上相应的孔加工出来。当用两个或两个以上的支承 1 来引导镗杆时，镗杆与机床主轴必须浮动连接，机床主轴回转误差对孔系加工精度影响很小，因而可以在精度较低的机床上加工出精度较高的平行孔系。同时，镗杆刚度大大地提高，有利于采用多刀同时切削；定位夹紧迅速，不需找正，生产效率高。因此不仅在中批生产中普遍采用镗模技术加工孔系，就是在小批生产中，对一些结构复杂、加工量大的箱体孔系，采用镗模加工也是合算的。

另外，由于镗模上自身的制造误差和导套与镗杆的配合间隙对孔系加工精度有一定影响，所以，该方法不可能达到很高的加工精度。一般孔径尺寸精度为 IT7 左右，镗模加工一般孔径尺寸精度为 IT7 左右，表面粗糙度值 R_a 为 1.6～0.8μm，加工的孔距精度主要取决于镗模制造精度、镗杆导套与镗杆的配合精度。当从一端加工、镗杆两端均有导向支承时，孔与孔之间的同轴度和平行度可达 0.02～0.03mm；当分别由两端加工时，可达 0.04～0.05mm。

(3) 坐标法

坐标法是按照孔系的坐标尺寸，在普通卧式铣镗床、坐标镗床或数控镗铣床上，借助于测量装置调整机床主轴与工件在水平和垂直方向的相对位置，以保证孔距精度的一种镗孔方法。图 5-18 所示是在卧式铣镗床上用百分表 1 和量规 2 来调整主轴垂直和水平坐标位置的示意图。

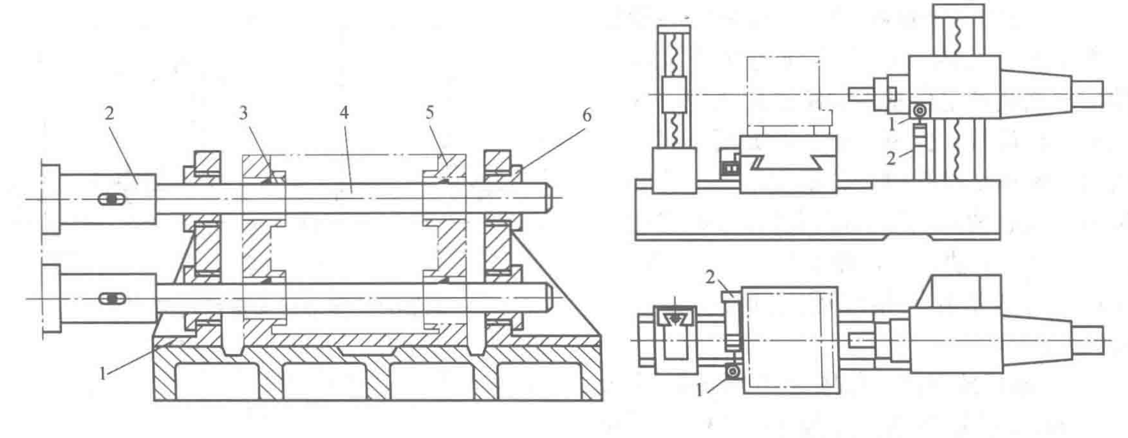


图 5-17　用镗模加工孔系

1—镗架支承；2—镗床主轴；3—镗刀；4—镗杆；5—工件；6—导套

图 5-18　在卧式铣镗床上用坐标法加工孔系

1—百分表；2—量规

坐标法镗孔的孔距精度取决于坐标的移动精度，也就是取决于镗床坐标测量装置的精度。采用坐标法加工孔系的机床可分两类：一类是具有较高坐标位移精度、定位精度及测量装置的坐标控制机床，如坐标镗床、数控镗铣床、加工中心等。这类机床可以很方便地采用坐标法加工精度较高的孔系。另一类是没有精密坐标位移装置及测量装置的普通机床，如普通镗床、落地镗床、铣床等。这类机床如采用坐标法加工孔系可选用下述方法来保证位置精度。普通镗床的坐标测量装置形式很多，有普通刻线尺与游标尺加放大镜测量装置（精度为 0.1～0.3mm)、精密刻线尺与光学读数头测量装置（读数精度为 0.01mm)，还有光栅数字显示装置和感应同步器测量装置（精度可达 0.002 5～0.01mm)、磁栅和激光干涉仪等。

采用坐标法加工孔系时，要特别注意选择基准孔和镗孔顺序，否则坐标尺寸的累积误差会影响孔距精度。基准孔应尽量选择本身尺寸精度高、表面粗糙度值小的孔（一般为主轴孔)，这样在加工过程中检验其坐标尺寸。有孔距精度要求的两孔应连在一起加工，加工时应尽量使工作台朝同一方向移动，因为工作台多次往复其间隙会产生误差，影响坐标精度。

2. 同轴孔系的加工

同轴孔系的加工主要是保证同一轴线上各孔的同轴度。在中批及大批大量生产中，一般用镗模加工孔系，其同轴度由镗模保证。当孔径大小向一个方向递减，且相邻两孔直径之差大于孔的毛坯加工余量时，镗杆和刀具从一端伸入，同时加工同轴线上的各孔，同轴度误差可达 0.03～0.02mm；当孔径大小从两端向中间递减，镗杆和刀具从两端同时加工，同轴度误差可达0.05～0.04mm。单件小批生产中，其同轴度用下面几种方法来保证。

(1) 利用已加工孔作支承导向

如图 5-19 所示，当箱体前壁上的孔加工好后，在孔内装一导向套，支承和引导镗杆加

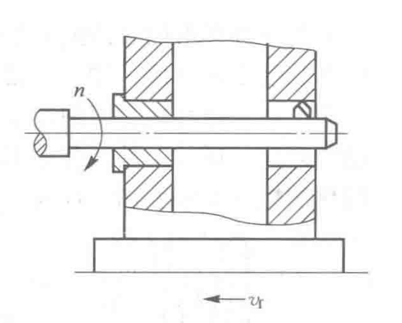


图 5-19　利用已加工孔导向

工后壁上的孔，以保证两孔的同轴度要求。这种方法只适于加工箱壁较近的孔。

（2）利用铣镗床后立柱上的导向套支承导向

采用这种方法，镗杆是两端支承，刚性好。但立柱导套的位置调整麻烦、费时，往往需要用心轴块规找正，且需要用较长的镗杆很笨重，故只适于大型箱体的加工。

（3）采用调头镗

当箱体箱壁相距较远时，可采用调头镗。工件在一次装夹下，镗好一端孔后，将镗床工作台回转 180°，再调整工作台位置，使已加工孔与镗床主轴同轴，然后再加工另一端孔。

当箱体上有一较长并与所镗孔轴线有平行度要求的平面时，镗孔前应先用装在镗杆上的百分表对此平面进行校正，如图 5-20（a）所示，使其和镗杆轴线平行，校正后加工孔 B，B 孔加工后，回转工作台，并用镗杆上装的百分表沿此平面重新校正，这样就可保证工作台准确地回转 180°，如图 5-20（b）所示，然后再加工 A 孔，从而保证 A，B 孔同轴。

3. 交叉孔系的加工

箱体上交叉孔系的加工主要是控制有关孔的垂直误差。在多面加工的组合机床上加工垂直孔系，其垂直度主要由机床和模板保证；在普通镗床上主要靠机床工作台上的 90°对准装置。因为它是挡块装置，故结构简单，但对准精度低。为了提高定位精度可用心轴与百分表找正，即在加工好的孔中插入心轴，然后将工作台转 90°，移动工作台用百分表找正，如图 5-21 所示。箱体上如果有交叉孔存在，则应将精度要求高或表面要求较精细的孔全部加工好，然后再加工另外与之相交叉的孔。

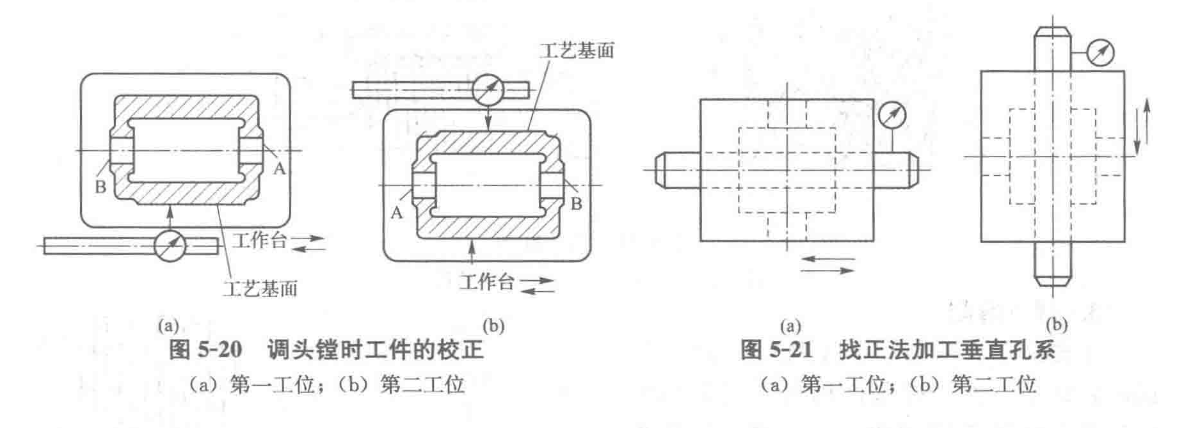


图 5-20　调头镗时工件的校正

（a）第一工位；（b）第二工位

图 5-21　找正法加工垂直孔系

（a）第一工位；（b）第二工位

5.3.3　螺纹加工

螺纹加工方法主要有车削、铣削、攻丝、套丝、磨削、研磨等。车削、铣削和磨削螺纹时，工件每转一转，机床的传动链保证车刀、铣刀或砂轮沿工件轴向准确而均匀地移动一个导程。在攻丝或套丝时，刀具（丝锥或板牙）与工件作相对旋转运动，并由先形成的螺纹沟槽引导着刀具（或工件）作轴向移动。

1. 螺纹车削

车螺纹指采用螺纹车刀或螺纹梳刀在车床上加工螺纹，螺纹车削如图 5-22 所示。螺纹

车刀是一种截形简单的成形车刀（含内、外螺纹及成形螺纹车刀），它结构简单，通用性好。但车螺纹生产率低，加工质量取决于工人技术水平和机床、刀具的精度，适用于单件、小批量生产。用螺纹梳刀车削螺纹，生产效率高，但刀具结构复杂，只适于中、大批量生产中车削细牙的短螺纹工件。普通车床车削梯形螺纹的螺距精度一般只能达到IT8～IT9级；在专门化的螺纹车床上加工螺纹，生产率或精度可显著提高。

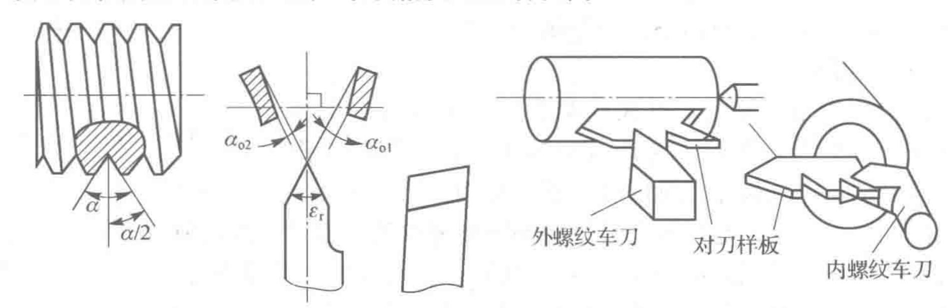


图 5-22　螺纹车削及刀具安装

2. 螺纹铣削

在螺纹铣床上用盘形铣刀或梳形铣刀进行铣削，如图 5-23 所示。盘形铣刀主要用于铣削丝杆、蜗杆等工件上的梯形外螺纹。梳形铣刀用于铣削内、外普通螺纹和锥螺纹，由于是用多刃铣刀铣削、其工作部分的长度又大于被加工螺纹的长度，故工件只需要旋转 1.25～1.5 转就可加工完成，生产率很高。螺纹铣削的螺距精度一般能达IT8～IT9 级，表面粗糙度为 R_a0.5～0.63μm。这种方法适用于成批生产一般精度的螺纹工件或磨削前的粗加工。

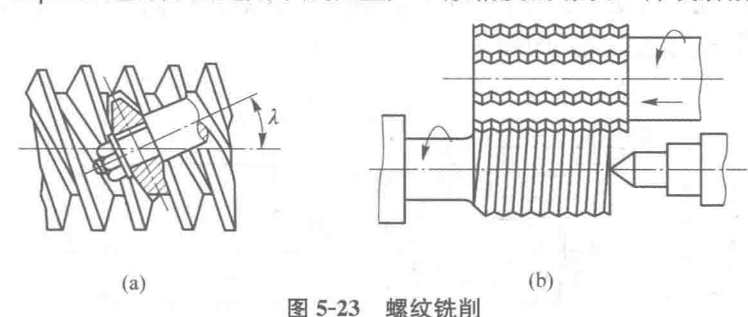


图 5-23　螺纹铣削

（a）盘形螺纹铣削；（b）梳形螺纹铣削

3. 螺纹磨削

主要用于在螺纹磨床上加工淬硬工件的精密螺纹，按砂轮截面形状不同分单线砂轮和多线砂轮磨削两种。单线砂轮磨削能达到的螺距精度为IT5～IT6 级，表面粗糙度为 R_a1.25～0.08μm，砂轮修整较方便。这种方法适于磨削精密丝杠、螺纹量规、蜗杆、小批量的螺纹工件和铲磨精密滚刀。多线砂轮磨削又分纵磨法和切入磨法两种。纵磨法的砂轮宽度小于被磨螺纹长度，砂轮纵向移动一次或数次行程即可

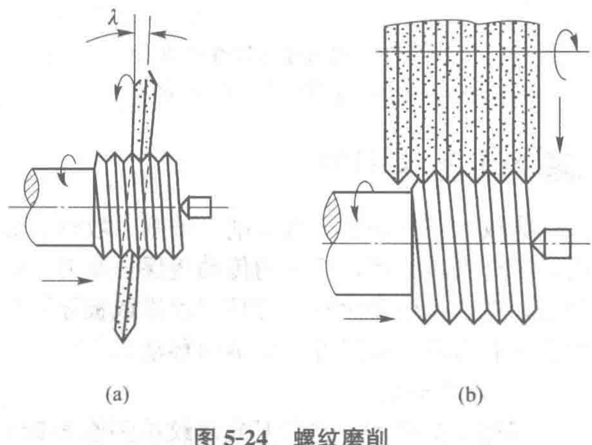


图 5-24　螺纹磨削

（a）单线砂轮磨削；（b）梳形砂轮磨削

把螺纹磨到最后尺寸。切入磨法的砂轮宽度大于被磨螺纹长度，砂轮径向切入工件表面，工件约转 1.25 转就可磨好，生产率较高，但精度稍低，砂轮修整比较复杂。切入磨法适于铲磨批量较大的丝锥和磨削某些紧固用的螺纹。图 5-24 所示为单线砂轮磨削和梳形砂轮磨削。

4. 攻丝和套丝

攻丝（见图 5-25（a））是用一定的扭距将丝锥旋入工件上预钻的底孔中加工出内螺纹。套丝（见图 5-25（b））用板牙套丝是用板牙在棒料（或管料）工件上切出外螺纹。攻丝或套丝的加工精度取决于丝锥或板牙的精度。加工内、外螺纹的方法虽然很多，但小直径的内螺纹只能依靠丝锥加工。攻丝和套丝可用手工操作，也可用车床、钻床、攻丝机和套丝机。

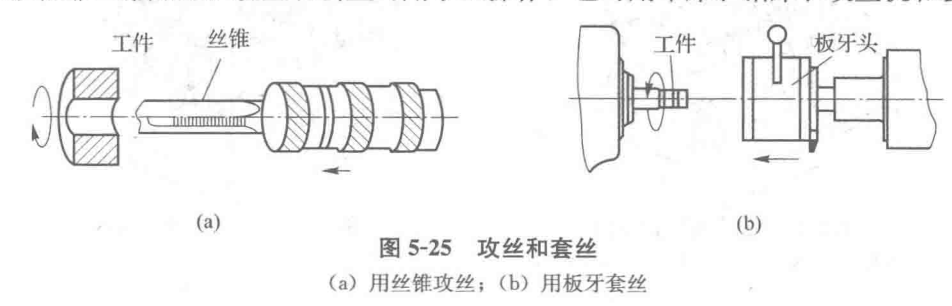


图 5-25　攻丝和套丝

（a）用丝锥攻丝；（b）用板牙套丝

5.4　箱体类零件加工设备

箱体类零件常用的平面加工设备有铣床、刨床、平面磨床等，孔加工设备有钻床、镗床等，既能加工面又能加工孔的是组合机床。

5.4.1　铣床

铣床是机械制造行业中应用十分广泛的一种机床，在铣床上可以加工各种平面、沟槽、齿槽、螺旋形表面及各种成形表面等，如图 5-6 所示。铣床的主要类型有卧式升降台铣床、立式升降台铣床、床身式铣床、龙门铣床、工具铣床和各种专门化铣床。

1. 升降台铣床

图 5-26 所示为卧式升降台铣床，加工的工件尺寸、重量都不大时，多使用这类机床。该铣床由底座 8、床柱 1、悬梁支架 4、升降台 7、床鞍 6、工作台 5 及装在主轴上的刀杆 3 等主要部件组成。床身 1 固定在底座 8 上，床身上顶部的燕尾形导轨上装有悬梁 2，可沿主轴轴线方向调整其前后位置。刀杆支架 4 用于支承刀杆的悬伸端。升降台 7 装在床身 1 的垂直导轨上，可以上下（垂直）移动，升降台内装有进给电动机。升降台的水平导轨上装有床鞍 6，可沿平行于主轴轴线的方向移动。工作台 5 装在床鞍 6 的导轨上，可沿垂直于主轴轴线的方向移动。床柱内部装有主传动系统，经主轴、刀杆传动刀具作旋转主运动。工件用夹具或分度头等附件安装在工作台上，也可以用压板直接固定在工作台上。万能卧式升降台式铣床的结构与卧式升降台式铣床基本相同，但在工作台 5 和床鞍 6 之间增加了一层转盘。转盘相对于床鞍在水平面内可绕垂直轴线在±45°范围内转动，用于铣削螺旋槽。

卧式升降台式铣床配置立铣头后，可作为立式铣床使用。立式升降台铣床的外形如图 5-27 所示，它与卧式升降台铣床的区别在于，其主轴 2 为垂直布置，立铣头 1 可以在垂直面

内倾斜调整成某一角度，并且主轴套筒可沿轴向调整其伸出的长度。

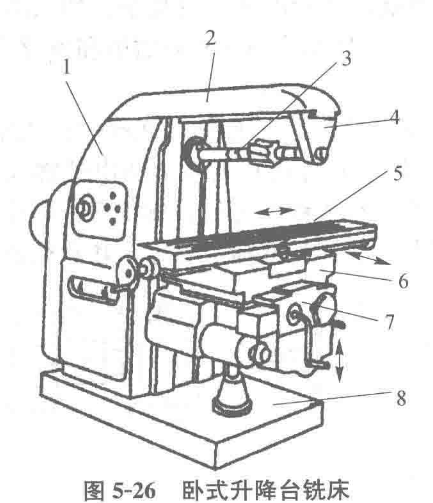


图 5-26 卧式升降台铣床

1—床柱；2—悬梁；3—刀杆；4—悬梁支架；5—工作台；6—床鞍；7—升降台；8—底座

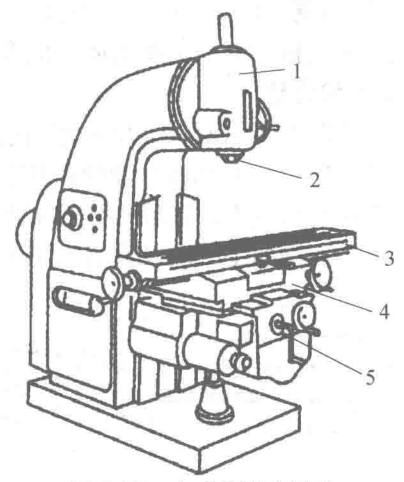


图 5-27 立式升降台铣床

1—立铣头；2—主轴；3—工作台；4—床鞍；5—升降台

2. 床身式铣床

床身式铣床常用于加工中等尺寸的零件。它的工作台不作升降运动，机床垂直方向的进给运动由主轴箱沿立柱导轨运动来实现。床身式铣床的工作台有圆形和矩形两类。一种双轴圆形工作台的铣床如图 5-28 所示，其工作台 3 与滑座 2 可作横向移动，以调整工作台与主轴间的相对位置。主轴套筒能在垂直方向调整位置，以保证规定的铣削深度。工作台上可装多套夹具，在机床正面装卸工件，加工时工作台缓慢旋转作圆周方向进给，两主轴上的端铣刀分别完成粗铣和半精铣加工。由于加工是连续进行的，在成批或大量生产中加工中、小型工件，其生产率较高。

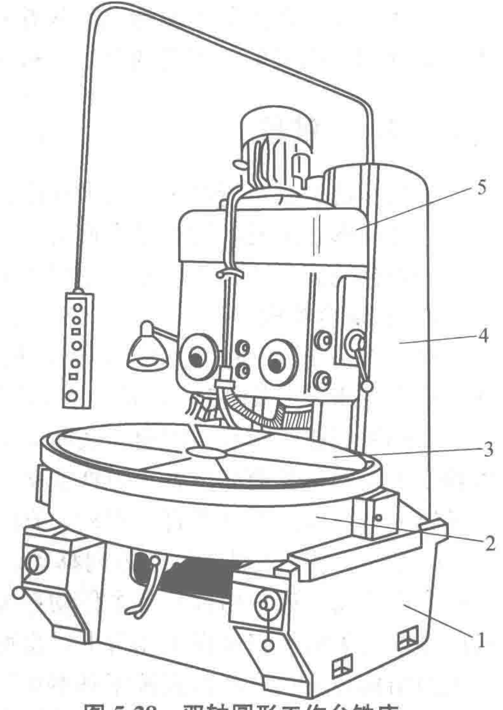


图 5-28 双轴圆形工作台铣床

1—床身；2—滑座；3—工作台；4—立柱；5—主轴箱

3. 龙门铣床

龙门铣床是大型、高效通用机床，主要用于各种大型工件上的平面、沟槽等的粗铣、半精铣或精铣加工，也可借助于附件加工斜面和内孔。

图 5-29 所示为龙门铣床的外形。其立柱 5 和 7、床身 10 与顶梁 6 组成一个门式框架，其刚性较好。横梁 3 可沿立柱上的导轨垂直移动，以调整位置。两个铣头 4 和 8 可沿横梁上的导轨作横向移动，两立柱上也各有一个铣头 2 和 9，可以沿立柱导轨垂直移动。4 个铣头都有单独的主运动电机和传动系统，其主轴转速和箱体位置都是独立调整的，每个铣头的主轴套筒连同主轴可在其轴

线方向调整位置并锁紧。加工时，工件固定在工作台 1 上，工作台沿床身上的导轨作纵向进给运动。由于龙门铣床能用多把铣刀同时加工几个平面，所以生产率高，适于成批或大量生产。

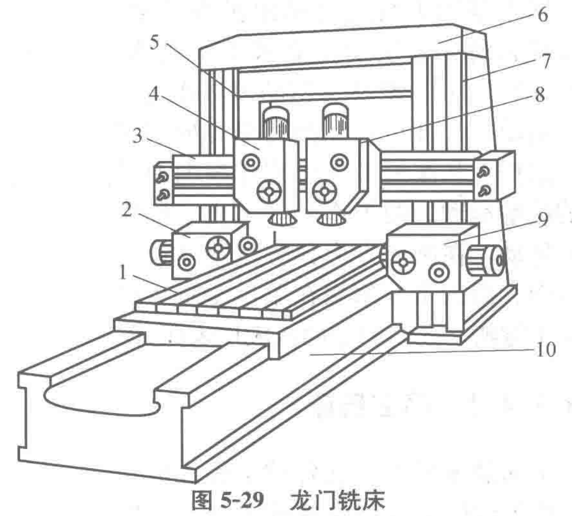


图 5-29 龙门铣床

1—工作台；2，4，8，9—铣头；3—横梁；5，7—立柱；6—顶梁；10—床身

5.4.2 刨床

刨床类机床主要用于加工各种平面和沟槽。主要有牛头刨床、龙门刨床和插床三种类型。

图 5-30 所示为牛头刨床的外形，主要由床身、滑枕、刀架、横梁、工作台组成。床身 1 的顶部有水平导轨，滑枕 2 由曲柄摇杆机构或液压传动，带着刀架 3 沿导轨作往复上运动。横梁 5 可连同工作台 4 沿床身上的导轨上、下移动调整位置。刀架可在左、右两个方向调整角度以刨削斜面，并能在刀架座的导轨上作进给运动或切入运动。刨削时，工作台及其上面安装的工件沿横梁上的导轨作间歇性的横向进给移动。牛头刨床的主要参数是最大刨削长度，它适用于单件小批生产或机修车间，主要用于加工中、小型零件。

龙门刨床主要用于加工大、重型工件上的各种平面、沟槽和各种导轨面。图 5-31 所示为龙门刨床的外形，其布局与龙门铣床相似，但工作台带着工件作主运动，速度远比龙门铣床工作台的速度高；龙门刨床的主要参数是最大刨削宽度。与牛头刨床相比，其体积大，结构复杂、刚性好，传动平稳，工作行程长，主要用来加工大型复杂零件的平面，或同时加工多个中、小型零件，加工精度和生产率都比牛头刨床高。

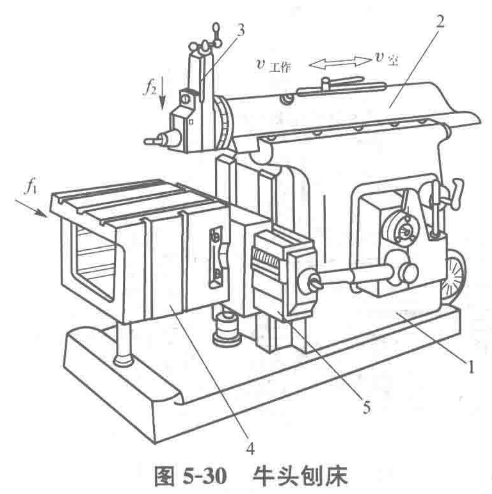


图 5-30 牛头刨床

1—床身；2—滑枕；3—刀架；4—工作台；5—横梁

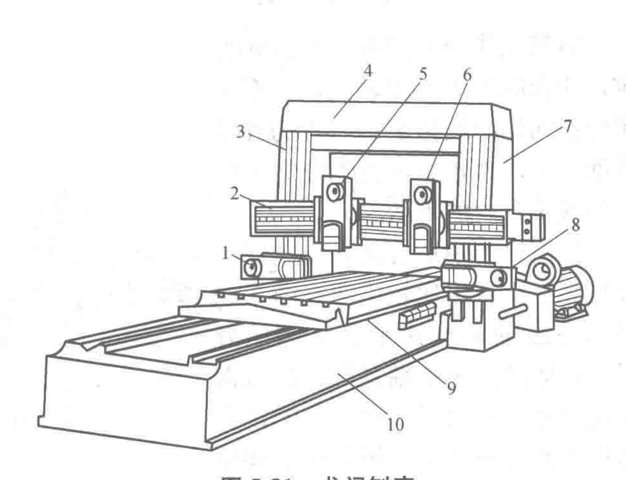


图 5-31 龙门刨床

1，5，6，8—刀架；2—横梁；3，7—立柱；4—顶梁；9—工作台；10—床身

插床多加工与安装基面垂直的面，如插键槽等，它实质是立式牛头刨床，如图 5-32 所示。滑枕 4 带动刀具作上下往复运动，工件可作纵横两个方向的移动。床鞍 1 和溜板 2 可分别作横向及纵向的进给运动。圆工作台 3 可由分度装置 5 传动，在圆周方向作分度运动或进给运动。插床主要用来在单件小批生产中加工键槽、孔内的平面或成形表面。

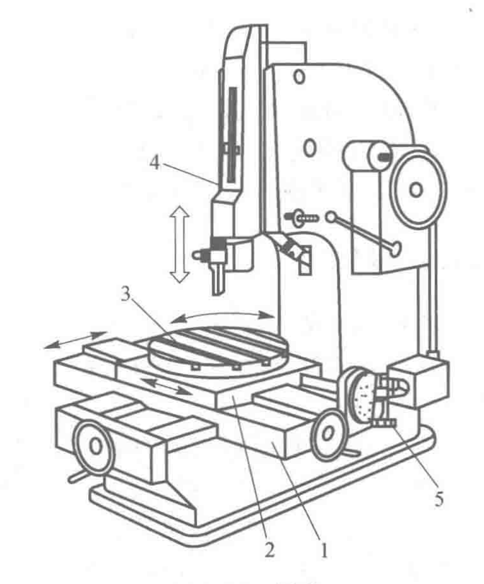
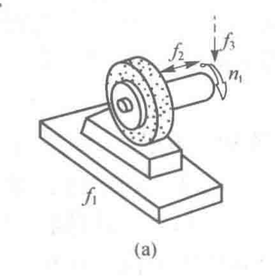


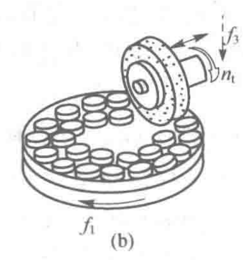
图 5-32　插床

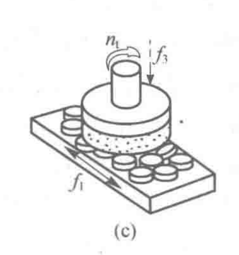
1—床鞍；2—溜板；3—圆工作台；4—滑枕；5—分度装置

5.4.3　平面磨床

平面磨床用于磨削各种工件上的平面。根据砂轮主轴的布置和工作台形状的不同，平面磨床主要有卧轴矩台式、卧轴圆台式、立轴矩台式、立轴圆台式四种类型，如图 5-33 所示。







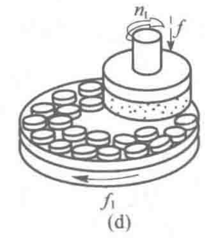


图 5-33　平面磨床的类型

(a) 卧轴矩台式；(b) 卧轴圆台式；(c) 立轴矩台式；(d) 立轴圆台式

矩形工作台与圆形工作台相比较，前者的加工范围较宽，但有工作台换向的时间损失；后者为连续磨削，生产率较高，但不能加工较长的或带台阶的平面。

目前，卧轴矩台式和立轴圆台式平面磨床应用比较广泛。图 5-34 所示为卧轴矩台式平面磨床的外形。机床的砂轮主轴是卧式的（即砂轮主轴平行于水平面），工作台是矩形的电磁吸盘，用砂轮的圆周面磨削平面，磨削时，工作台 2 沿床身 1 的导轨作纵向往复运动，矩台电磁吸盘吸住工件作往复直线运

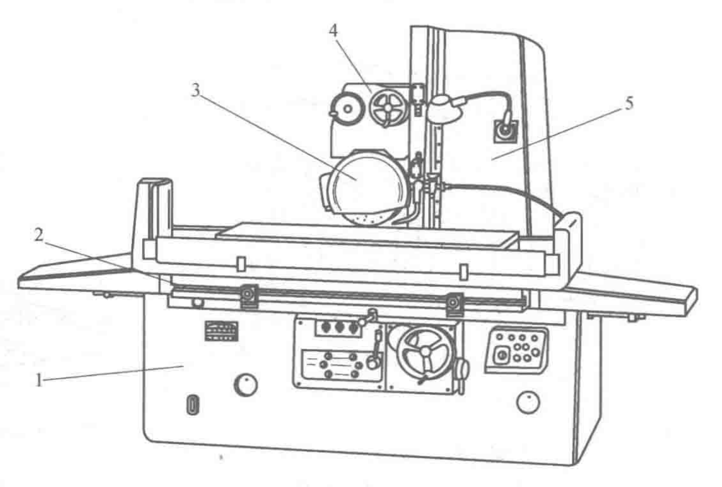


图 5-34　卧轴矩台平面磨床

1—床身；2—工作台；3—砂轮架；4—滑座；5—立柱

动，砂轮主轴除高速旋转外，每当工作台往复一次或换向以后瞬间，都要横向移动一小段距离，经过多次横向进给，使工件表面磨去一层。

5.4.4　镗床

镗孔可以在多种机床上进行。回转体零件上的孔多在车床上加工，箱体类零件上的孔或孔系（指要求相互平行或垂直的若干个孔）则常用镗床加工。

镗床的主要功用是用镗刀镗削工件上已铸出或已钻出的孔。除镗孔外，大部分镗床还可以进行铣削、钻孔、扩孔、铰孔等工作。镗床的主要类型有卧式铣镗床、坐标镗床和精镗床等。

1. 卧式铣镗床

图 5-35 所示为卧式铣镗床的外形。由下滑座 11、上滑座 12 和工作台 3 组成的工作台部件装在床身导轨上，工作台通过下滑座和上滑座可在纵向和横向实现进给运动和调位运动。工作台还可在上滑座 12 的环形导轨上绕垂直轴线转位，以便在工件一次安装中对其互相平行或成一定角度的孔或平面进行加工。主轴箱 8 可沿前立柱 7 的垂直导轨上下移动，以实现垂直进给运动或调整主轴轴线在垂直方向的位置。此外，机床上还有坐标测量装置，以实现主轴箱和工作台的准确定位。加工时，根据加工情况不同，刀具可以装在镗轴 4 前端的锥孔中，或装在平旋盘的径向刀具溜板 6 上。镗轴 4 除完成旋转主运动外，还可沿其轴线移动做轴向进给运动（由后尾筒 9 内的轴向进给机构完成），平旋盘 5 只能做旋转主运动。装在平旋盘径向导轨上的径向刀具溜板 6，除了随平旋盘一起旋转外，还可做径向进给运动。后支架 1 用以支承悬伸长度较长的镗杆的悬伸端，以增加刚性。后支架可沿后立柱 2 的垂直导轨与主轴箱 8 同步升降，以保证其支承孔与镗轴在同一轴线上。为适应不同长度的镗杆，后立柱还可沿床身导轨调整纵向位置。

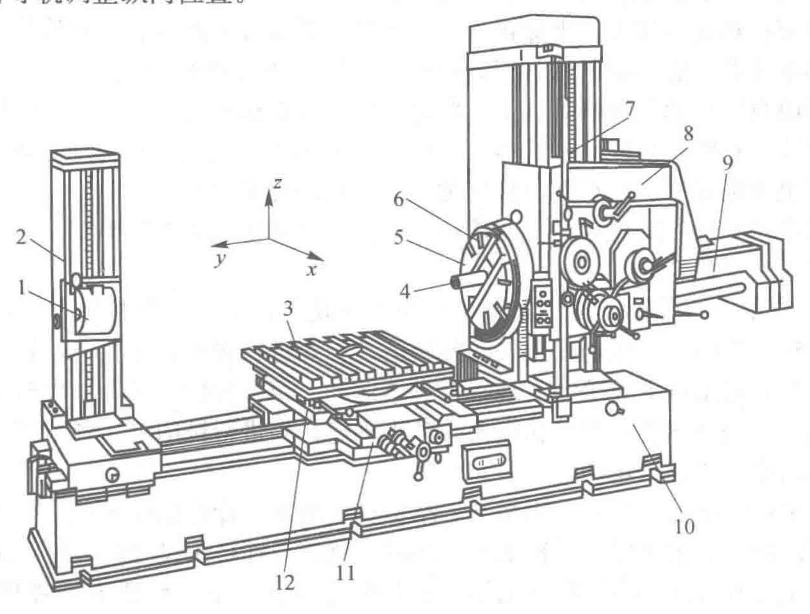


图 5-35　卧式铣镗床

1—后支架；2—后立柱；3—工作台；4—镗轴；5—平旋盘；6—径向刀具溜板；7—前立柱；8—主轴箱；9—后尾筒；10—床身；11—下滑座；12—上滑座

综上所述，卧式铣镗床的主运动有：镗轴和平旋盘的旋转运动。进给运动有镗轴的轴向进给运动，平旋盘刀具溜板的径向进给运动，主轴箱的垂直进给运动，工作台的纵向和横向进给运动。辅助运动有工作台的转位，后立柱的纵向调位，后支架的垂直方向调位，以及主轴箱沿垂直方向和工作台沿纵、横方向的调位运动。

图 5-36 所示为卧式铣镗床的几种典型加工方法。图 5-36（a）所示为用装在镗轴上的悬伸刀杆镗孔；图 5-36（b）所示为利用长刀杆镗削同轴线上的两孔；图 5-36（c）所示为用装在平旋盘上的悬伸刀杆镗削大直径的孔；图 5-36（d）所示为用装在镗轴上的端铣刀铣平面；图 5-36（e）（f）所示为用装在平旋盘径向刀具溜板上的车刀车内沟槽和端面。

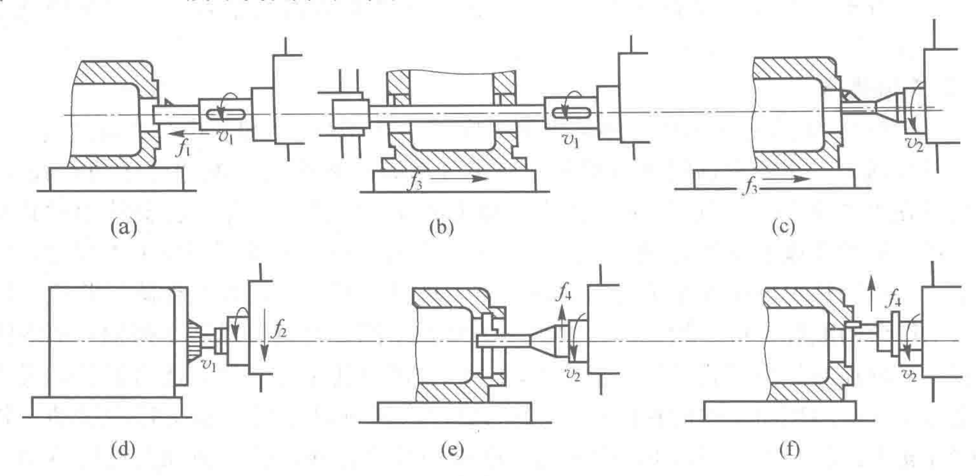


图 5-36 卧式铣镗床的典型加工方法

2. 坐标镗床

坐标镗床主要用于精密孔及位置精度要求很高的孔系的加工。例如，钻模、镗模和量具等零件上的精密孔和孔系加工。坐标镗床的主要特点是具有工作台、主轴箱等移动部件的精密坐标位置测量装置，能实现工件和刀具的精确定位。坐标镗床除镗孔外，还可进行钻、扩和铰孔、锪端面及铣平面和沟槽等加工。此外，因其具有很高的定位精度，故还可用于精密刻线、精密划线、孔距及直线尺寸的精密测量等。坐标镗床过去主要用于工具车间进行单件生产，近年来也逐渐用于生产车间成批地加工具有精密孔系的零件。

坐标镗床按其布局形式可分为立式单柱、立式双柱和卧式等主要类型。

（1）立式单柱坐标镗床

如图 5-37 所示，主轴箱 3 装在立柱 4 的垂直导轨上，可上下调整位置。主轴 2 由精密轴承支承在主轴套筒中，主运动是主轴的旋转运动。当进行镗孔、钻孔、铰孔等工序时，主轴连同主轴套筒，可由机动或手动实现垂直进给运动。镗孔坐标位置由工作台 1 沿床鞍 5 的导轨纵向移动和床鞍沿床身 6 的导轨横向移动来确定；当进行铣削时，则由工作台 1 通过在纵向或横向移动来完成进给运动。

立式单柱坐标镗床的工作台三面敞开，结构比较简单，操作比较方便。但由于工作台和床身之间的层次较多，主轴箱又悬臂安装，削弱了刚度，在机床尺寸较大时，主轴中心线离立柱较远，影响主轴的加工精度。因此，立式单柱一般为中、小型坐标镗床采用的布局形式。

立式双柱坐标镗床具有由两侧立柱、顶梁和床身构成的龙门框架式结构。主轴箱（装在

龙门框架上）其悬伸距离较小，并且工作台和床身之间层次少，所以，刚度较高，承载能力较强。因此，大、中型坐标镗床常采用这种布局形式。

（2）卧式坐标镗床

如图 5-38 所示，其主轴水平布置，与工作台台面平行。安装工件的工作台由下滑座 7、上滑座 1 以及可作精密分度的回转工作台 2 等三层组成。镗孔的坐标位置由下滑座沿床身 6 的导轨纵向移动和主轴箱 5 沿立柱 4 的导轨垂直移动来确定。镗孔时的进给运动，可由主轴 3 轴向移动来完成，也可由上滑座 1 横向移动来完成。

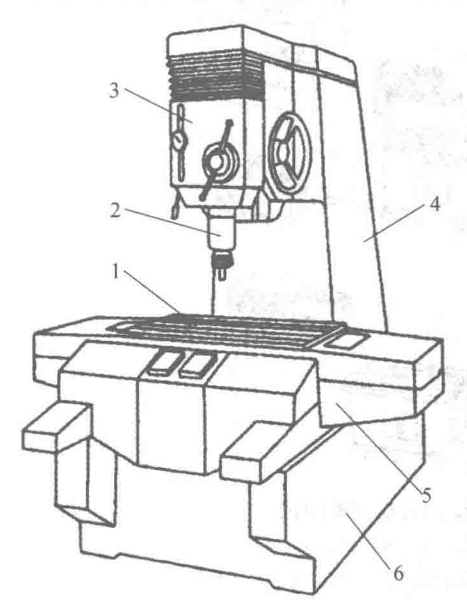


图 5-37 立式单柱坐标镗床

1—工作台；2—主轴；3—主轴箱；4—立柱；5—床鞍；6—床身

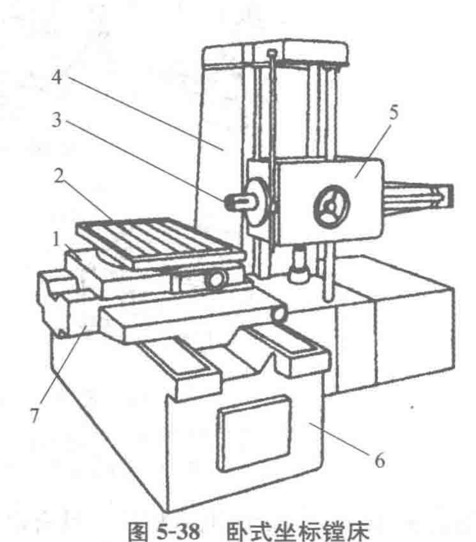


图 5-38 卧式坐标镗床

1—上滑座；2—回转工作台；3—主轴；4—立柱；5—主轴箱；6—床身；7—下滑座

5.4.5 组合机床

组合机床是根据特定工件的加工要求，以系列化、标准化的通用部件为基础，配以少量的专用部件所组成的专用机床。组合机床的工艺范围主要属于平面加工和孔加工，如铣平面、车端面、锪平面、钻孔、扩孔、铰孔、镗孔、倒角、切槽、攻螺纹、锪沉头孔、滚压孔等。

组合机床最适于加工箱体类零件，如气缸体、气缸盖、变速箱体、阀门与仪表的壳体等。这些零件的加工表面主要是孔和平面，几乎都可以在组合机床上完成。另外，轴类、盘类、套类及叉架类零件，如曲轴、气缸套、连杆、飞轮、法兰盘、拨叉等，也能在组合机床上完成部分或全部加工工序。

图 5-39 所示为一种典型的双面复合式单工位组合机床。被加工工件装夹在夹具 5 中，加工时工件固定不动，镗削头 6 上的镗刀和多轴箱 4 中各主轴上的刀具分别由电动机通过动力箱 3 驱动作旋转主运动，并由各自的滑台 7 带动作直线进给运动，在机床电气控制系统控制下，完成一定形式的运动循环。整台机床的组成部件中，除多轴箱和夹具是专用部件外，

其余均为通用部件。即使是专用部件，其中也有不少零件是通用件和标准件。通常一台组合机床中，通用部件和零件的数量占机床零、部件总数的70%～90%。

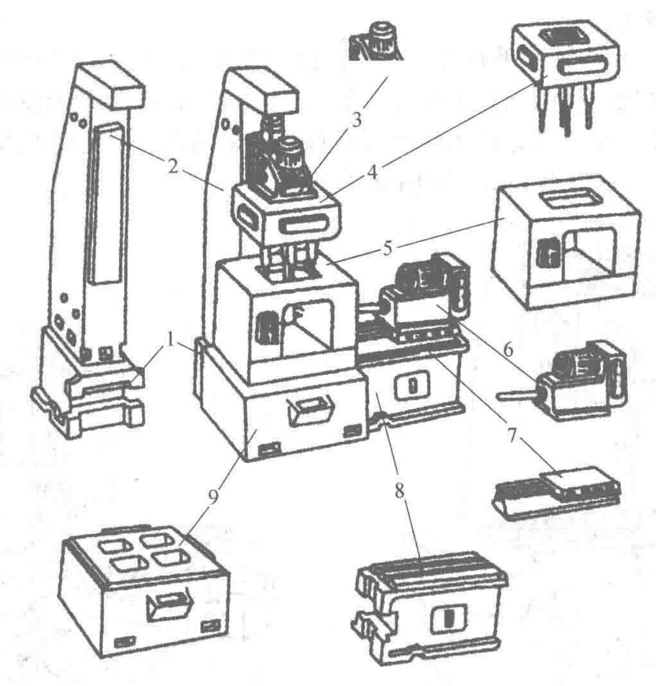


图 5-39 双面复合式单工位组合机床的组成

1—立柱底座；2—立柱；3—动力箱；4—多轴箱；5—夹具；6—镗削头；7—滑台；8—侧底座；9—中间底座

组合机床与一般专用机床相比，具有以下特点。

1）设计、制造周期短。这主要是由于组合机床的专用部件少，通用部件由专门工厂生产，可根据需要直接选购。

2）加工效率高。组合机床可采用多刀、多轴、多面、多工位和多件加工，因此特别适用于汽车、拖拉机、电机等行业定型产品的大批量生产。

3）当加工对象改变后，通用零、部件可重复使用，组成新的组合机床，不致因产品的更新而造成设备的大量浪费。

5.5 箱体类零件的加工刀具

5.5.1 铣刀

铣刀是刀齿分布在圆周表面或端面上的多刃回转刀具，可以用来加工平面（水平、垂直或倾斜的）、台阶、沟槽和各种成形表面等。铣刀的种类很多，按用途可分为加工平面用铣刀、加工沟槽用铣刀、加工成形面用铣刀三种类型，如图 5-40 所示。

1. 加工平面用铣刀

(1) 面铣刀

面铣刀如图 5-40 (a) 所示，也叫端铣刀。铣刀主切削刃分布圆柱或圆锥表面上，端面切削刃为副切削刃。工作时，铣刀的轴线垂直于被加工面，多用在立式铣床上加工平面，特别适合较大平面的加工。面铣刀安装后刚性好，可采用较大的切削用量，生产率较高；由于副切削刃的修光作用，使加工表面粗糙度值小，应用广泛。

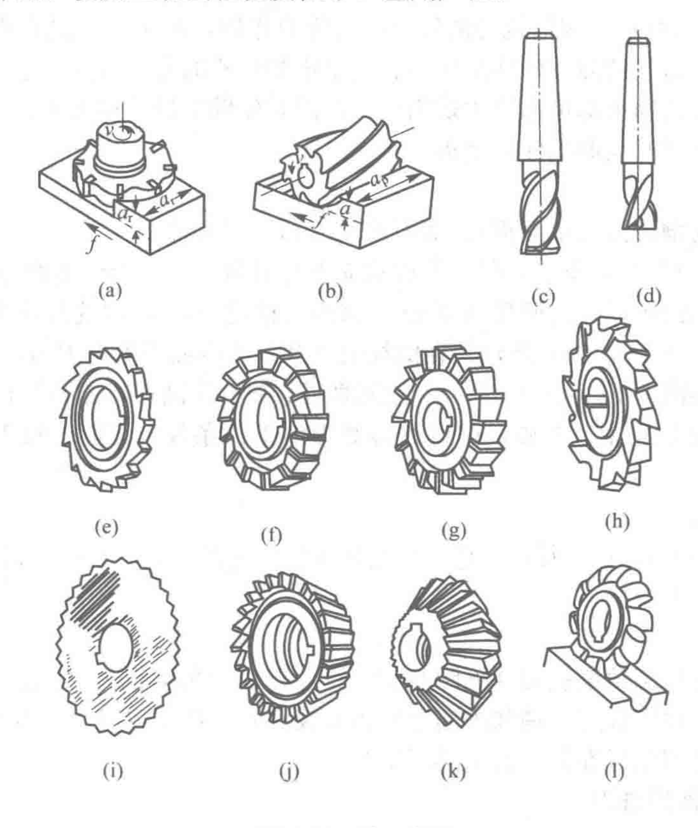


图 5-40 铣刀类型

(a) 面铣刀；(b) 圆柱铣刀；(c) 立铣刀；(d) 键槽铣刀；
(e) 槽铣刀；(f) 两面刃铣刀；(g) 三面刃铣刀；(h) 错齿三面刃铣刀；
(i) 锯片铣刀；(j) 单面角度铣刀；(k) 双面角度铣刀；(l) 成形铣刀

(2) 圆柱铣刀

圆柱铣刀如图 5-40 (b) 所示，用于在卧式铣床上加工平面，特点是切削刃成螺旋线状分布在圆柱表面上，无副切削刃。按结构形式又分为高速钢整体式和硬质合金镶齿式。这种铣刀安装后刚性较差，容易产生振动，生产率低，主要用于卧式铣床上加工宽度小于铣刀长度的狭长平面。根据加工要求不同，圆柱铣刀有粗齿、细齿之分。粗齿的容屑槽大，用于粗加工，细齿用于精加工。

2. 加工沟槽用铣刀

(1) 立铣刀

如图 5-40 (c) 所示，立铣刀可用于加工平面、台阶面、沟槽等。立铣刀一般由 3 或 4

个刀齿组成，圆柱面上的螺旋切削刃是主切削刃，端面上的切削刃是副切削刃，所以它不同于孔加工刀具，一般不能沿轴向进给。

端部做成球形的球头立铣刀，其球面切削刃也是主切削刃，它从轴线开始，所以可用这种立铣刀作沿轴线进给的切削运动，用于多坐标加工三维成形表面。立铣刀借助于锥柄或直柄装夹在铣床主轴上。

（2）键槽铣刀

如图 5-40（d）所示，键槽铣刀的外形与立铣刀相似，所不同的是它在圆周上只有两个螺旋刀齿，其端面刀齿的刀刃延伸至中心。它是铣制键槽的专用刀具，它仅有两个刃瓣，其圆周切削刃和端面切削刃都可作为主切削刃，使用时先轴向进给切入工件，然后沿键槽方向进给铣出键槽，重磨时仅磨端面切削刃。

（3）盘形铣刀

盘形铣刀分为槽铣刀（单面刃）、两面刃铣刀和三面刃铣刀。

槽铣刀如图 5-40（e）所示，仅在圆柱表面上有刀齿，为了减少端面与沟槽侧面的摩擦，两侧端面做成内凹的锥面，内凹角为 0°30′。该角度也就是 κ_r'，槽铣刀只能用于加工浅槽。

两面刃铣刀如图 5-40（f）所示，在圆柱表面和一个端面上做有刀齿，用于加工台阶面。

三面刃铣刀如图 5-40（g）所示，在两侧端面上都有切削刃。错齿三面刃铣刀（见图 5-40（h））的刀齿交错地左、右旋，可以改善侧刃的工作条件。三面刃铣刀用于加工沟槽或台阶面。

（4）锯片铣刀

锯片铣刀如图 5-40（i）所示，它实际上是薄的槽铣刀，但齿数少，以增大容屑槽容积，用于切断材料或切深窄槽。

（5）角度铣刀

角度铣刀分为单面角度铣刀（见图 5-40（j））和双面角度铣刀（见图 5-40（k）），用于铣削沟槽和斜面。角度铣刀大端和小端直径相差较大时，往往造成小端刀齿过密，容屑空间较小。加工沟槽铣刀已标准化，由工具厂生产。

3. 加工成形面用铣刀

（1）成形铣刀

成形铣刀（见图 5-40（l））是在普通铣床上加工成形沟槽的刀具，刀齿廓形要根据被加工工件的廓形来确定。

（2）模具铣刀

模具铣刀用于加工模具型腔或凸模成形表面，在模具制造中广泛应用。按工作部分外形可分为圆锥形平头、圆柱形球头、圆锥形球头等。硬质合金模具铣刀可取代金刚石锉刀或磨头来加工淬火后硬度小于 HRC65 的各种模具，切削效率可提高几十倍。

5.5.2 刨刀

刨刀的种类很多，由于刨削加工的形式和内容不同，采用的刨刀类型也不同。常用的刨刀有平面刨刀、偏刀、切刀、弯头刀等，如图 5-41 所示。

1）平面刨刀：用来刨平面。

2）偏刀：用来刨削垂直面台阶面和外斜面等。

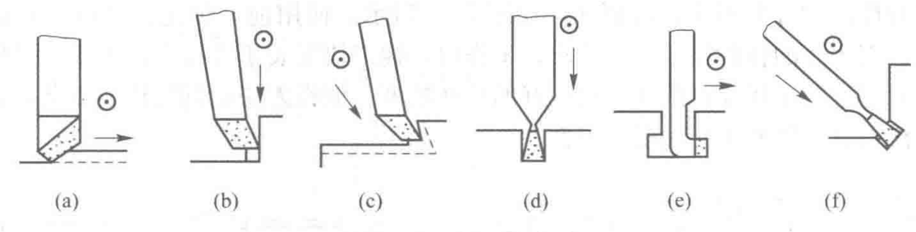


图 5-41　刨刀的类型

(a) 平面刨刀；(b) 偏刀；(c) 角度偏刀；(d) 切刀；(e) 弯头刀 (f) 样板刀

3）切刀：用来刨削直角槽、沉割槽，并具有切断作用。

4）弯头刀：用来刨削 T 形槽和侧面割槽。

5）角度偏刀：用来刨削角度形工件、燕尾槽和内斜槽。

6）样板刀：用来刨削 V 形槽和特殊形状的表面。

刨刀的结构基本上与车刀类似，但刨刀工作时为断续切削，受冲击载荷。因此，在同样的切削截面下，刀杆断面尺寸较车刀大 1.25～1.5 倍，并采用较大的负刃倾角（－20°～－10°），以提高切削刃抗冲击载荷的性能。为了避免刨刀刀杆在切削力作用下产生弯曲变形，从而使刀刃啃入工件，通常使用弯头刨刀。重型机器制造中常采用焊接一机械夹固式刨刀，即将刀片焊接在小刀头上，然后夹固在刀杆上，以利于刀具的焊接、刃磨和装卸。在刨削大平面时，可采用滚切刨刀，其切削部分为碗形刀头。圆形切削刃在切削力的作用下连续旋转，因此刀具磨损均匀，寿命很高。

5.5.3　镗刀

镗刀的种类较多，分类也较复杂，按切削刃的数量来分，可分为单刃镗刀和双刃镗刀；按用途可分为内孔镗刀、端面镗刀；按镗刀的结构可分为整体式单刃镗刀、镗刀头、固定式镗刀块、浮动镗刀块等。本书按镗刀的结构分类来分别介绍有关镗刀。

1）整体式单刃镗刀。这类镗刀的刀柄和切削部分做成一体，切削部分以采用硬质合金焊接为主，其刀柄一般为圆柱直柄和锥柄两种，如图 5-42 所示。

整体式单刃镗刀结构紧凑、体积小、应用较广，可以镗削各类小孔、不通孔和台阶孔。若装在万能刀架或平旋盘滑座上，可以镗削直径较大的孔、端面和割槽等。

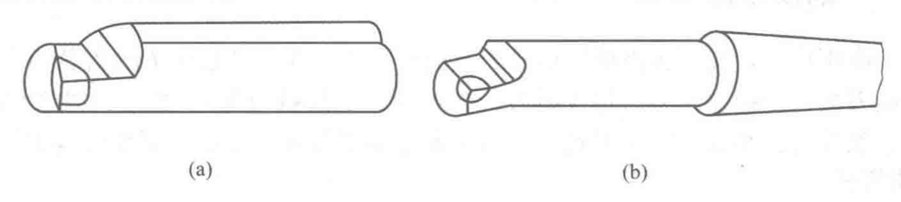


图 5-42　整体式单刃镗刀

(a) 圆柱直柄；(b) 圆柱锥柄

2）镗刀头。镗刀头一般插入镗杆中进行镗削加工，刀头采用整体合金钢材料或硬质合金刀片焊接而成，其截面形状有方形和圆形，配置于镗杆的方孔或圆孔中，应用很普遍，如图 5-43 所示。

3）镗刀块。镗刀块是定径刀具，其形式为一种矩形薄片刀块，采用整体合金钢材料或

在切削部分用硬质合金刀片焊接而成，如图 5-44 所示。使用前，预先刃磨好各种镗刀块的直径尺寸，满足孔的各种尺寸公差要求。工作时，镗刀块安装于镗杆上，由于镗刀块和镗杆孔的配合及定位要求较高，故能获得良好的镗孔精度。但镗刀块的制造比较复杂，而且刃口磨损后无法调整，故使用有一定局限性。

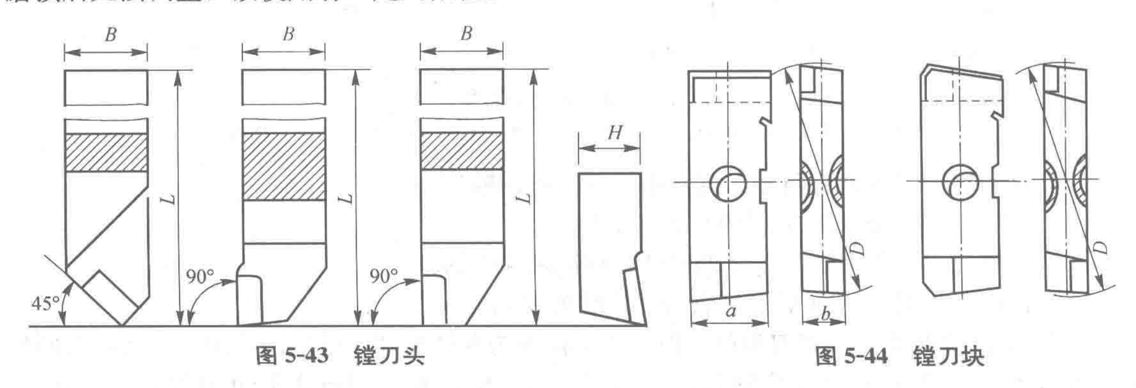


图 5-43　镗刀头　　　　图 5-44　镗刀块

4）浮动镗刀。这是一种直径尺寸可调的镗刀块，如图 5-45 所示。浮动镗刀与镗杆孔精确配合，并可以在镗杆中滑动。镗削时，由两对称的切削刃产生的切削力自动平衡其径向位置，使镗刀自动对中心进行切削。浮动镗刀还有挤压和修光作用，所以浮动镗刀一般根据镗床的功能，整体式单刃镗刀可以镗削各类小孔、外圆、不通孔和台阶孔，利用万能刀架或平旋盘滑座可以镗削大直径孔、端面及割槽等；比镗刀头的用途更为广泛，可以用来加工全部箱体孔系，特别是同轴孔系加工，可以用来镗削通孔、台阶孔和刮削端面等；固定镗刀块主要适用于成批生产中孔的粗加工镗削，其加工性能好、生产效率高；浮动镗刀块适用于孔的精加工镗削，能获得良好的形状精度和较高的表面质量。除此以外，利用其他辅具，镗刀还可以加工内外圆锥、螺纹、内外球面等。

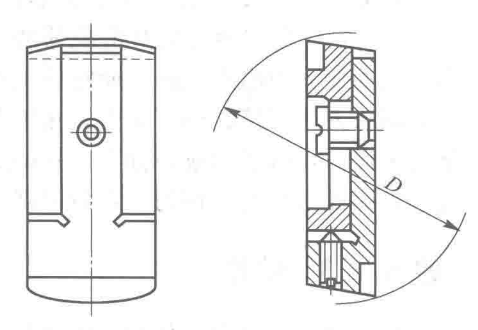


图 5-45　浮动镗刀

5.5.4　螺纹刀具

螺纹的应用很广，加工各种螺纹用的刀具的种类也很多。按加工方法可分为主要用于加工外螺纹的刀具（如螺纹车刀、螺纹梳刀、圆板牙、螺纹铣刀等）、加工内螺纹的刀具（如内螺纹刀、丝锥等）和螺纹滚压工具。下面主要介绍圆板牙、丝锥、螺纹滚压工具。

1. 圆板牙

板牙是加工外螺纹的标准刀具之一，实质上是具有切削角度的螺母，板牙可分为圆板牙、方板牙、六角板牙、管形板牙、钳式板牙等。图 5-46 所示是圆板牙的结构。圆板牙的外形象一个圆螺母，只是沿轴向钻有 3～8 个排屑孔以形成切削刃，并在两端做有切削锥部，用于加工圆柱螺纹。而加工锥形螺纹的圆板牙只做一个切削锥部。

圆板牙的结构简单，制造方便，在单件、小批量生产及修配中应用广泛，但仅用来加工精度 6h～8h 和表面质量要求不高的螺纹。

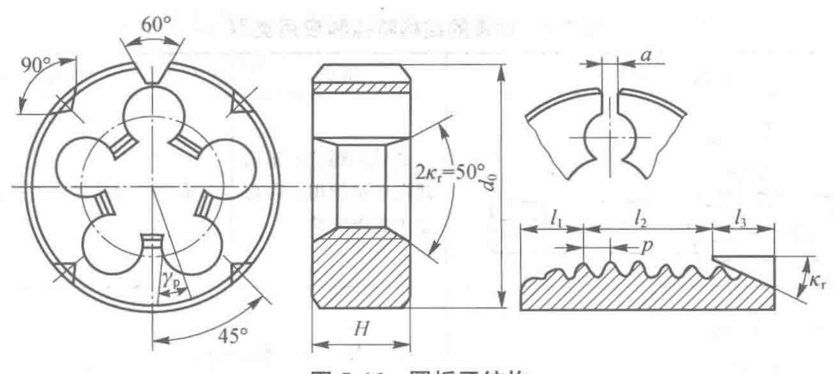


图 5-46 圆板牙结构

2. 丝锥

丝锥就是用螺栓制作的，为了能够切削，在端部磨出切削锥，沿轴向开出容屑槽而形成切削刃，丝锥结构简单，使用方便，生产率较高，用于中、小尺寸的内螺纹加工。手用丝锥的结构如图5-47所示，机用丝锥是将柄部加长。丝锥的结构特点和应用类型见表5-1。

1）切削部分。切削部分磨出切削锥角 $2\kappa_r$，使齿形高度不完整。这样，切削工作能均匀地分配在几个刀齿上，切削平稳，而且轴向对中性好。

2）校准部分。校准部分 L_0 是丝锥工作时的导向部分，也是丝锥重磨后的储备部分，它具有完整的齿形，为了减少与工件之间的摩擦，外径和中径向柄部逐渐缩小，一般缩小量为（0.05～0.12）mm/100mm。

3）容屑槽。一般情况下容屑槽有三个，为了制造方便，沿轴向是直槽，槽底是圆弧面。

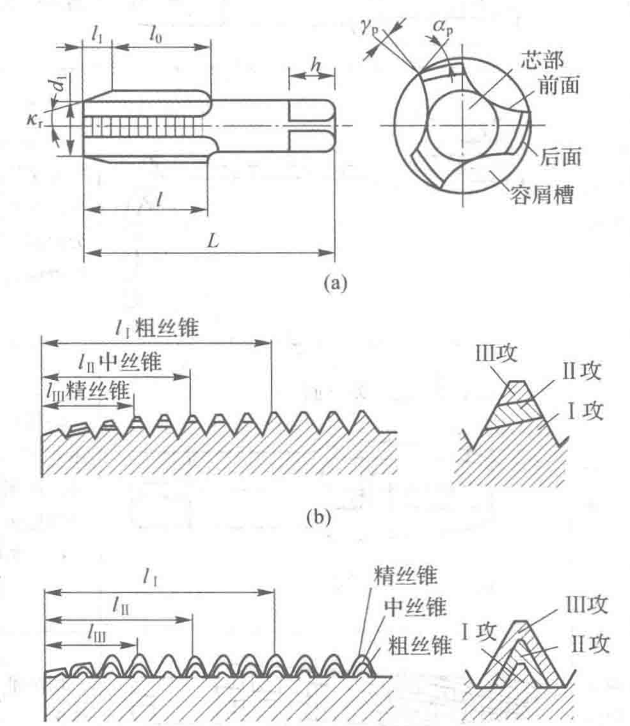


图 5-47 丝锥的结构

（a）丝锥的结构；（b）锥形切削图形；（c）柱形切削图形

4）前角和后角。丝锥的前角 γ_p 和后角 α_p，均在端剖面内测量。加工钢和铸铁时，$\gamma_p=3^\circ\sim10^\circ$，加工铝合金时，$\gamma_p=15^\circ\sim18^\circ$。后角 α_p 一般取4°～12°。

3. 螺纹滚压工具

滚压螺纹属于无屑加工，适用于加工塑性材料，生产率和加工精度高，滚压后的螺纹机械性能好。常用的螺纹滚压工具有滚丝轮和搓丝板。

表 5-1　丝锥的结构特点和应用类型

类型	简图及国际代号	特点	适用范围
手用丝锥	l　l_1　45°	手动攻螺纹，常用两把成组使用。用合金工具钢制造	单件小批量生产通孔、不通孔螺纹
机用丝锥	l　l_1　45°	用于钻、车、镗、铣床上，切削速度较高。经缠磨齿形，用高速钢制造	成批大量生产通孔、不通孔螺纹
螺母丝锥	l　l_1　ϕ　d　R	切削锥较长，攻螺纹完毕工件从柄尾流出。丝锥不需倒转。分短柄、长柄、弯柄三种结构	大量生产专供螺母攻螺纹
锥形丝锥	l_0　基准面　l_1　ϕ　d_0　l	切削锥角与螺纹锥角相等，无校准部分。攻螺纹时要强迫最螺旋运动。并控制攻螺纹长度	专供锥管螺纹攻螺纹
板牙丝锥		切削锥加长，齿数增多	板牙攻螺纹

(1) 滚丝轮

两个滚丝轮的螺纹旋向相同，与工件螺纹旋向相反，装在相互平行的轴上，齿纹错开半个螺距。工作时两个滚丝轮同向、等速旋转，工件放在中间的支撑板上，当动滚丝轮径向靠紧时，工件逐渐受压，产生塑性变形而形成螺纹。尺寸达到预定的尺寸后，动滚丝轮停止进给，继续滚转几周后修正了螺纹廓形，再退回动滚丝轮取下工件。设计滚丝轮时，其中径螺纹升角等于工件中径的螺纹升角。为了增大滚丝轮的直径和心轴的刚性，滚丝轮的螺纹头数是多头的。头数 $z=P_{滚轮}/P_{工件}$。

(2) 搓丝板

由静板和动板组成一对进行搓丝。当工件进入两块搓丝板之间时立即夹住并使之滚动，

最终由于塑性变形而被压出螺纹。搓丝板的生产率很高，但螺纹的精度不高。因滚压时径向压力较大，使被挤螺纹产生椭圆度。

5.6 箱体类零件的夹具

5.6.1 铣床夹具

1. 铣床夹具的类型与典型结构

铣床夹具主要用于加工工件上的平面、沟槽、缺口、花键及各类成形面等。铣床夹具常按机床的进给方式分为：直线进给式、回转进给式和曲线靠模进给式三种，以直线进给式最为常用。

如图 5-48 所示为一用来加工连杆上两对槽子的铣床夹具。工件的定位方式为两销一面，夹紧方式是用两套螺旋压板分布从两侧压紧。加工两槽分别用左右两菱形销定位，整个铣床夹具以底面两个定向键在铣床的工作台上的 T 形槽内定位，用螺栓固定。铣刀与工件的位置关系看直角对刀块来保证。

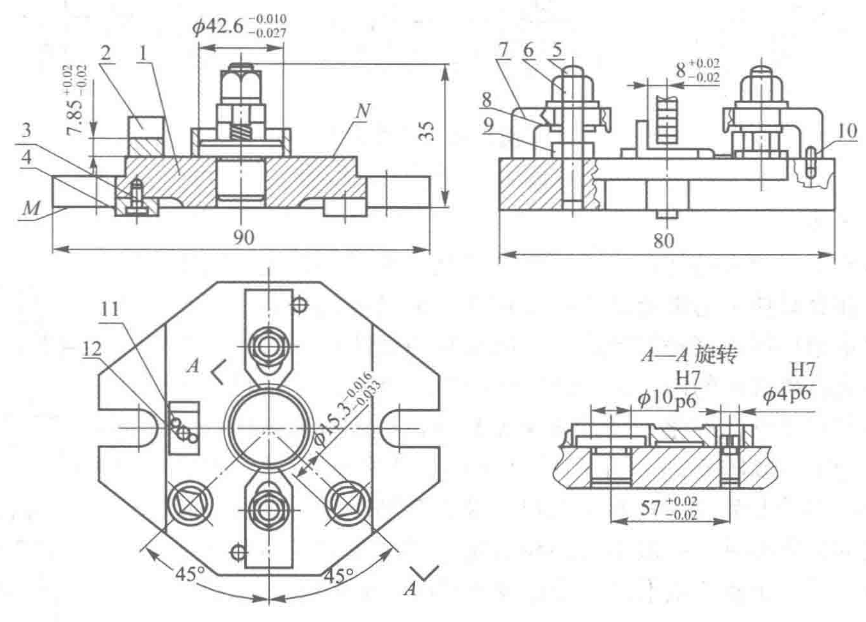


图 5-48 典型铣床夹具机构

1—夹具体；2—对刀块；3，4—定向装置；5～9—夹具装置；10—挡销；11—销子；12—螺钉

2. 铣床夹具的设计要点

(1) 铣床夹具总体结构

由于切削加工时切削力比较大，而且是断续切削，在切削过程中易引起强烈的冲击与振动，而且刀具易磨损，生产中需要经常调刀与换刀。因此，铣床夹具应具有以下特点：铣床夹具受力元件要有足够的强度和刚度；夹紧机构所提供的夹紧力应足够大，并且有较好的自锁

性和抗振性；为减少调刀、换刀时间，在夹具上应设置专门的对刀装置；为提供夹具的工作效率，应尽可能采用机动夹紧或联动夹紧机构，并在可能的情况下，采用多件夹紧和多件加工。

（2）对刀装置

铣床夹具安装后，必须调整铣刀与工件之间的相对位置，调整的方式有试削调整、标准件调整和对刀装置调整，对刀装置应用因方便而被广泛应用。对刀装置主要由对刀块与塞尺组成。塞尺用来检查刀具与对刀块间的间隙，以免刀具与对刀块直接接触而造成刀具对对刀块的损坏。塞尺的类型有两种且已标准化，一种是平塞尺，另一种是圆柱塞尺，一般用于曲面对刀或成形对刀的场合。

图 5-49 所示为常用的几种对刀块。如图 5-49（a）所示为高度对刀块，用在加工平面时的对刀；如图 5-49（b）所示为直角对刀块，用于加工键槽或台阶时对刀；如图 5-49（c）所示为成形对刀块，用于利用成形铣刀加工成形表面时的对刀。

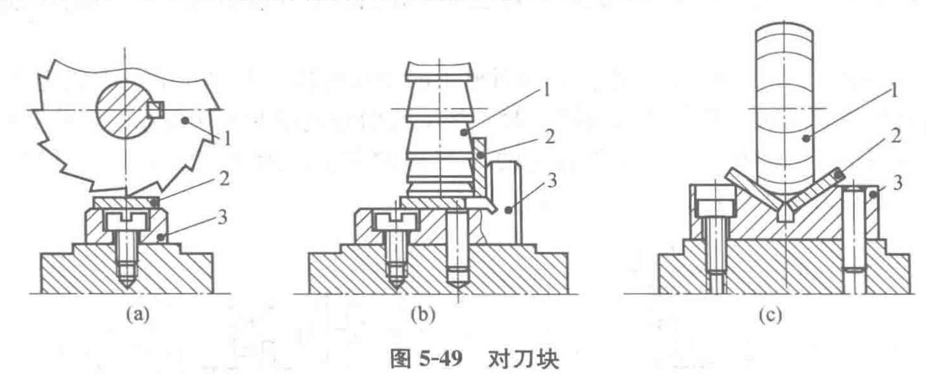


图 5-49　对刀块

1—铣刀；2—塞尺；3—对刀块

（3）夹具体

夹具体要承受较大的切削力，所以要求具有足够的强度、刚度和稳定性。在夹具体上通常要适当布置筋板，夹具体的安装面要尽量大，且尽量采用周边接触的形式。铣床夹具与铣床的连接，一般利用安装在夹具体底面的两个定位键与铣床工作台上的 T 形槽。定向键的结构与尺寸已标准化，设计铣床夹具时，可按铣床工作台的 T 形槽尺寸选取。如图 5-50 所示尺寸 d 与夹具体和 T 形槽的配合皆为 H9/h8。两定位键的距离尽量大以提高安装精度。对于安装精度要求较高的铣床夹具，一般不采用设置定位键的方式，而是在夹具体的一侧设置一个找正基准面，通过找正基准面来进行安装。

图 5-50　定位键的结构

5.6.2　镗床夹具

1. 镗床夹具的主要类型

镗床夹具又称镗模，主要用于加工箱体、支架类零件上的孔或孔系，它不仅在各类镗床上使用，也可在组合机床、车床及摇臂钻床上使用。镗模的结构与钻模相似，一般用镗套作为导向元件引导镗孔刀具或镗杆进行镗孔。镗套按照被加工孔或孔系的坐标位置布置在镗模支架上。按镗模支架在镗模上布置形式的不同，可分为双支承镗模、单支承镗模和无支承镗模等。

(1) 双支承镗模

双支承镗模上有两个引导镗刀杆的支承，镗杆与机床主轴采用浮动连接，镗孔的位置精度由镗模保证，消除了机床主轴回转误差对镗孔精度的影响。图 5-51 所示为镗削车床尾座孔的双支承镗模结构图。

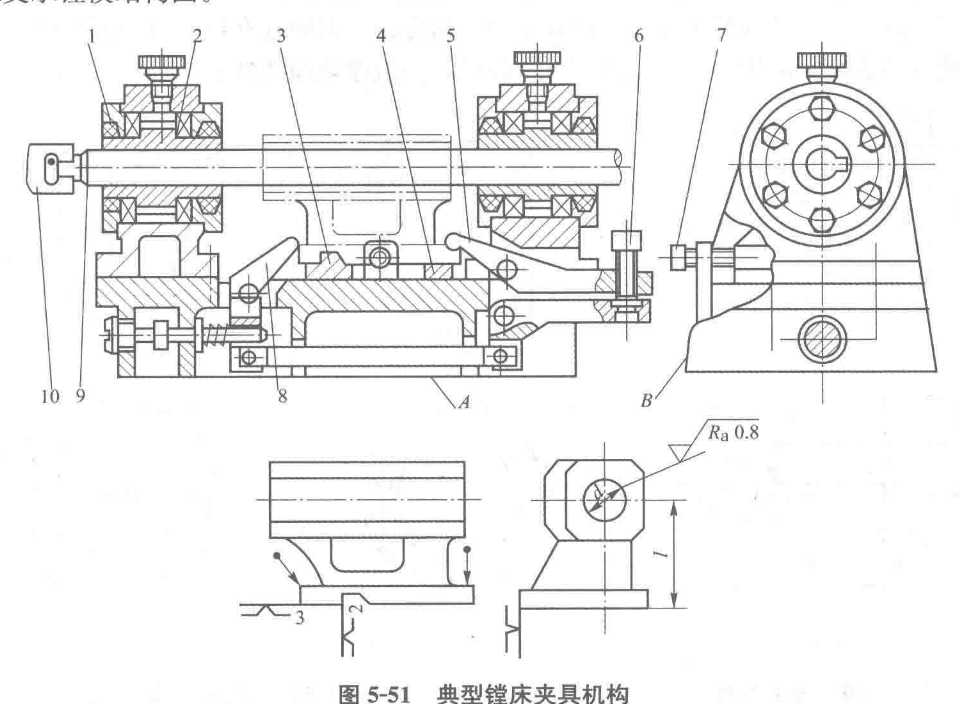


图 5-51　典型镗床夹具机构

1—支架；2—镗套；3，4—定位板；5，8—压板；6—夹紧螺钉；
7—可调支承钉；9—镗杆；10—浮动接头

镗模的两个支承分别设置在刀具的前方和后方，两个镗模支架 1 上用回转镗套 2 来支承和引导镗杆 9，镗杆 9 和镗床主轴通过浮动接头 10 连接，所以镗孔的位置精度主要取决于镗模支架上镗套孔之间的位置精度，而不受机床工作精度的影响。工件以底面、槽和侧面在定位板 3，4 及可调支承钉 7 上定位，限制 6 个自由度，采用联动夹紧机构，拧紧夹紧螺钉 6，压板 5，8 同时夹紧工件。镗模以底面 A 安装在机床工作台上，其位置用 B 面找正。

(2) 单支承镗模

单支承镗模只有一个导向支承，镗杆与主轴采用固定连接。安装镗模时，应使镗套轴线与机床主轴轴线重合。主轴的回转精度将影响镗孔精度。根据支承相对刀具的位置，单支承镗模又可分为两种，即前单支承镗模和后单支承镗模，如图 5-52 和图 5-53 所示。

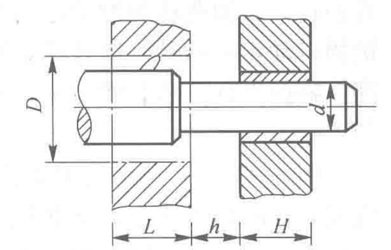


图 5-52　前单支承镗模镗孔

(3) 无支承镗床夹具

工件在刚性好、精度高的金刚镗床、坐标镗床或数控机床、加工中心上镗孔时，夹具上不设置镗模支承，加工孔的尺寸和位置精度均由镗床保证。这类夹具只需设计定位装置、夹紧装置和夹具体即可。

2. 镗床夹具的设计要点

(1) 镗套

1) 固定式镗套。固定式镗套是指加工时镗套不随镗杆转动的镗套，如图 5-54 所示。A 型不带油杯和油槽，靠镗杆上开的油槽润滑；B 型则带油杯和油槽，使镗杆和镗套之间能充分地润滑。固定式镗套外形尺寸小、结构简单、精度高，但镗杆在镗套内一面回转，一面做轴向移动，镗套容易磨损，故只适用于低速镗孔，一般摩擦面线速度 $v<0.3\text{m/s}$。

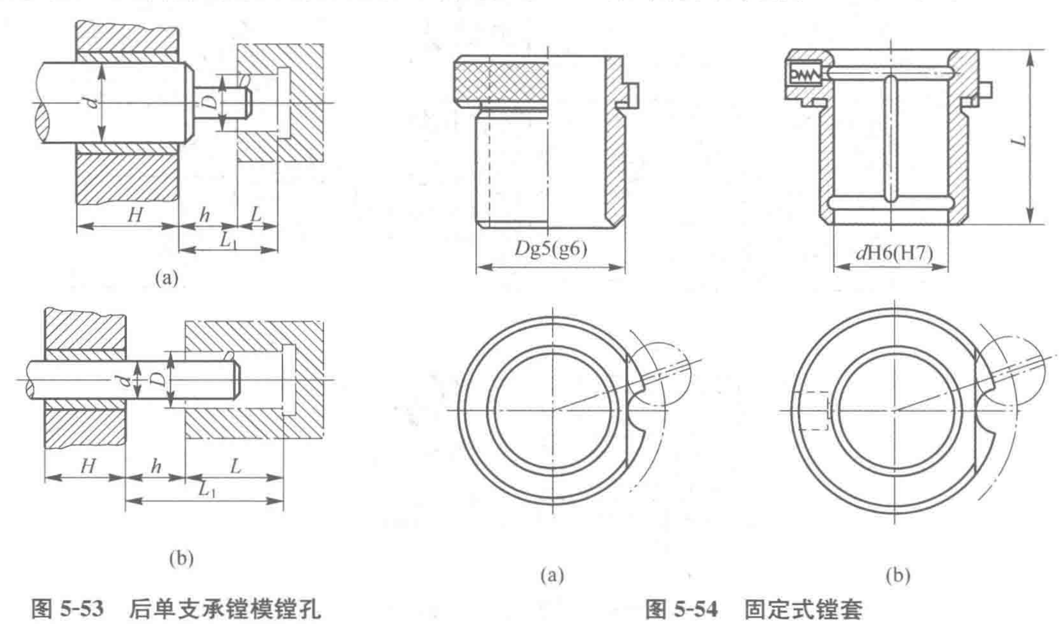


图 5-53　后单支承镗模镗孔

图 5-54　固定式镗套

(a) A 型；(b) B 型

2) 回转式镗套。回转式镗套随镗杆一起转动，镗杆与镗套之间只有相对移动而无相对转动，从而减少了镗套的磨损，不会因摩擦发热而卡死，因而适用于高速镗孔。回转式镗套又分为滑动式和滚动式两种。

图 5-55 (a) 所示为滑动式回转镗套，镗套 1 可在滑动轴承 2 内回转，镗模支架 3 上设置油杯，经油孔将润滑油送到回转副，使其充分润滑。镗套中间开有键槽，镗杆上的键通过键槽带动镗套回转。这种镗套的径向尺寸较小，适用于孔心距较小的孔系加工，且回转精度高，减振性好，承载能力大，但需要充分润滑。摩擦面线速度不能大于 0.4m/s，常用于精加工。

图 5-55 (b) 所示为滚动式回转镗套，镗套 6 支承在两个滚动轴承 4 上，轴承安装在镗模支架 3 的轴承孔中，支承孔两端分别用轴承端盖 5 封住。由于这种镗套采用了标准的滚动轴承，所以设计、制造和维修方便，而且对润滑要求较低，镗杆转速可大大提高，一般摩擦面线速度 $v>0.4\text{m/s}$。但径向尺寸较大，回转精度受轴承精度的影响。可采用滚针轴承以减小径向尺寸，采用高精度轴承以提高回转精度。

图 5-55 (c) 所示为立式滚动回转镗套，它的工作条件差。为避免切屑和切削液落入镗套，需设置防护罩。为承受轴向推力，一般采用圆锥滚子轴承。

镗套的材料常用 20 钢或 20Cr 钢渗碳，渗碳深度为 0.8～1.2mm，淬火硬度为HRC55～60。一般情况下，镗套的硬度应低于镗杆的硬度。若用磷青铜做固定式镗套，因为减摩性好

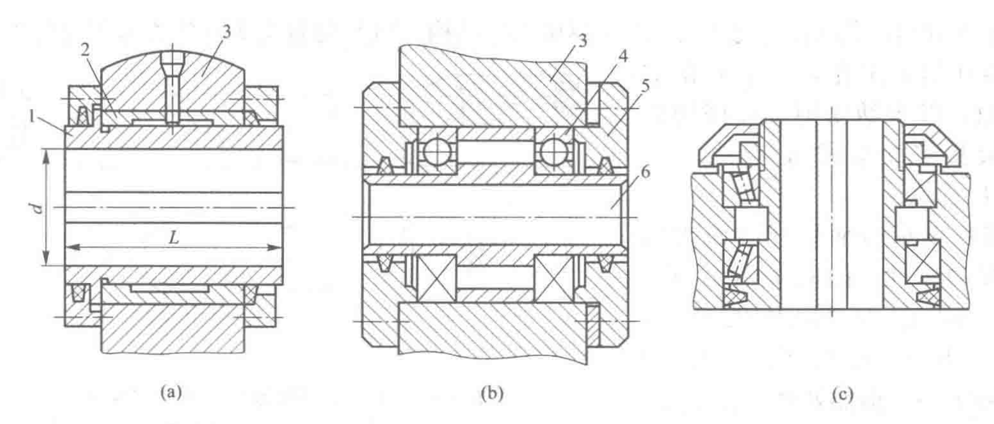


图 5-55　回转式镗套

(a) 滑动式回转镗套；(b) 滚动式回转镗套装；(c) 立式滚动回转镗套

1，6—镗套；2—滑动轴承；3—镗模支架；4—滚动轴承；5—轴承端盖

而不易与镗杆咬住，可用于高速镗孔，但成本较高。对于大直径镗套，或单件小批生产用的镗套，也可采用铸铁（HT200）材料。目前也有用粉末冶金制造的耐磨镗套。

(2) 镗杆

1) 固定式镗套的镗杆。图 5-56 所示为用于固定式镗套的镗杆导向部分结构。当镗杆导向部分直径 $d<50$mm 时，常采用整体式结构。图 5-56 (a) 所示为开油槽的镗杆，镗杆与镗套的接触面积大，磨损大，若切屑从油槽内进入镗套，则易出现卡死现象，但镗杆的刚度和强度较好。

图 5-56 (b) 和图 5-56 (c) 所示为有较深直槽和螺旋槽的镗杆，这种结构可大大减少镗杆与镗套的接触面积，沟槽内有一定的存屑能力，可减少卡死现象，但其刚度较低。

当镗杆导向部分直径 $d>50$mm 时，常采用如图 5-56 (d) 所示的镶条式结构。镶条应采用摩擦因数小和耐磨的材料，如铜或钢。镶条磨损后，可在底部加垫片，重新修磨使用。这种结构的摩擦面积小，容屑量大，不易卡死。

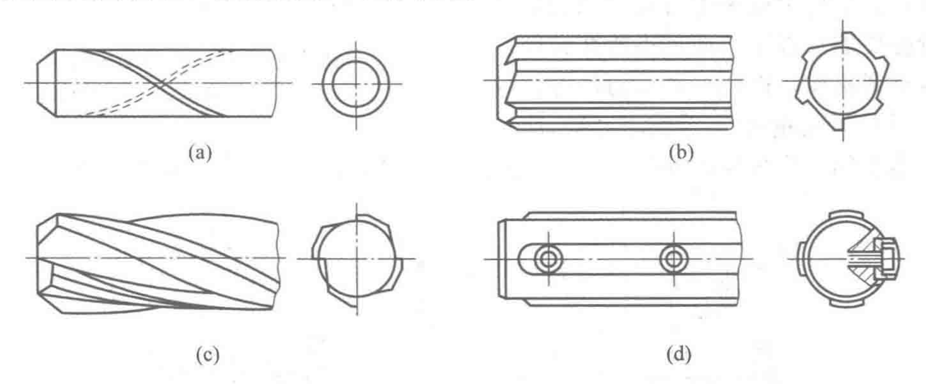


图 5-56　用于固定镗套的镗杆导向部分结构

(a) 开油槽镗杆；(b) 深直槽镗杆；(c) 螺旋槽镗杆；(d) 镶条式镗杆

2) 回转式镗套的镗杆。图 5-57 所示为用于回转镗套的镗杆引进结构。图 5-57 (a) 所示在镗杆前端设置平键，键下装有压缩弹簧，键的前部有斜面，适用于开有键槽的镗套。无论镗杆以何位置进入镗套，平键均能自动进入键槽，带动镗套回转。图 5-57 (b) 所示的镗

杆上开有键槽，其头部做成小于45°的螺旋引导结构，可与装有尖头键的镗套配合使用。

镗杆与加工孔之间应有足够的间隙，以容纳切屑。镗杆的直径一般按经验公式 $d=(0.7\sim0.8)D$ 选取。

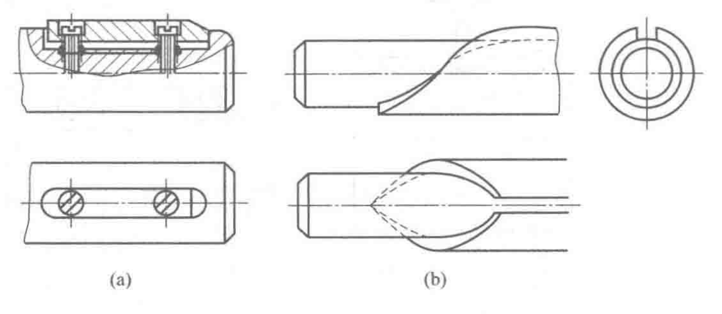


图 5-57 用于回转镗套的镗杆引进结构

(a) 设置平键；(b) 开键槽

镗杆要求表面硬度高而内部有较好的韧性，因此采用20钢、20Cr钢，渗碳淬火硬度为61～63HRC；也可用氮化钢38CrMoAlA，但热处理工艺复杂；大直径的镗杆，还可采用45，40Cr或65Mn钢。

(3) 浮动接头

采用双支承镗模镗孔时，镗杆均采用浮动接头与机床主轴连接，如图5-58所示为常用的浮动接头结构。镗杆1上拨动销3插入接头体2的槽中，镗杆与接头体之间留有浮动间隙，接头体的锥柄安装在主轴锥孔中。主轴的回转可通过接头体、拨动销传给镗杆。

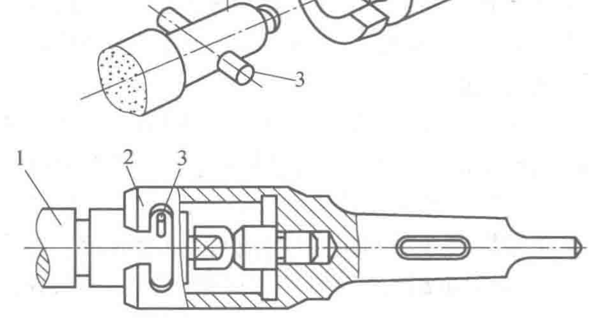


图 5-58 常用浮动接头结构

1—镗杆；2—接头体；3—拨动销

(4) 镗模支架和底座

镗模支架和底座多为铸铁件（一般为HT200），常分开制造，这样有利于夹具的加工、装配和铸件的时效处理。支架和底座用圆柱销和螺钉紧固。

镗模支架用于安装镗套，应有足够的强度和刚度，在结构上应考虑有较大的安装基面和设置必要的加强肋，而且不能在镗模支架上安装夹紧机构，以免夹紧反力使镗模支架变形，影响镗孔精度。图5-59 (a) 所示的设计是错误的，应采用图5-59 (b) 所示结构，夹紧反力由镗模底座承受。

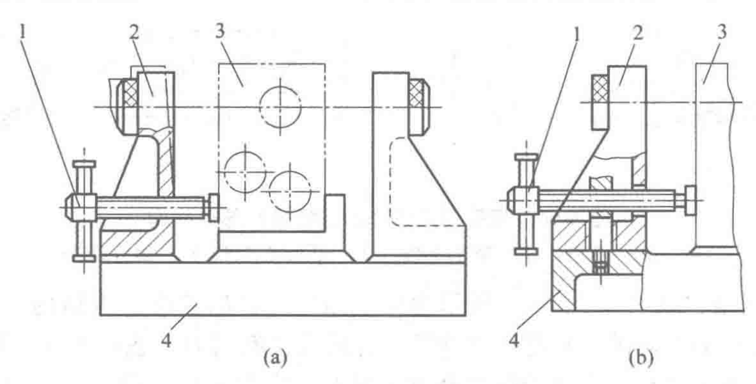


图 5-59 不允许镗模支架承受夹紧反力

1—夹紧螺钉；2—镗模支架；3—工件；4—镗模底座

镗模底座上要安装各种装置和工件，并承受切削力、夹紧力，因此要有足够的强度和刚度，并有较好的精度稳定性。镗模底座上安放定位元件和镗模支架等的平面应铸出高度为 3～5mm 的凸台，凸台需要刮研，使其对底面（安装基准面）有较高的垂直度或平行度。镗模底座上还应设置定位键或找正基面，以保证镗模在机床上安装时的正确位置。底座上应设置多个耳座，用以将镗模紧固在机床上。大型镗模的底座上还应设置手柄或吊环，以便搬运。

5.6.3 组合夹具

组合夹具是按照被加工工件的要求，利用一套预先制造好的，并且具有各种不同形状与不同规格尺寸的标准元件及合件组装而成的夹具。使用完毕后，夹具上所有的元件可以拆散，清洗入库，需要时再重新组装成新的夹具以满足不同的要求。

1. 组合夹具的特点

1）使用组合夹具可节省夹具的材料费、设计费、制造费，方便库存与管理。

2）组合时间短，能够缩短生产周期，提高效率。反复拆装，不受零件尺寸改动限制，可以随时更换夹具定位易磨损件。

3）组合夹具既有很大的通用性，又有专用夹具的优点。

4）组合夹具需要经常拆卸和组装，其结构与专用夹具相比显得复杂、笨重、刚度较差。

(5) 组合夹具一次投资多，成本高。

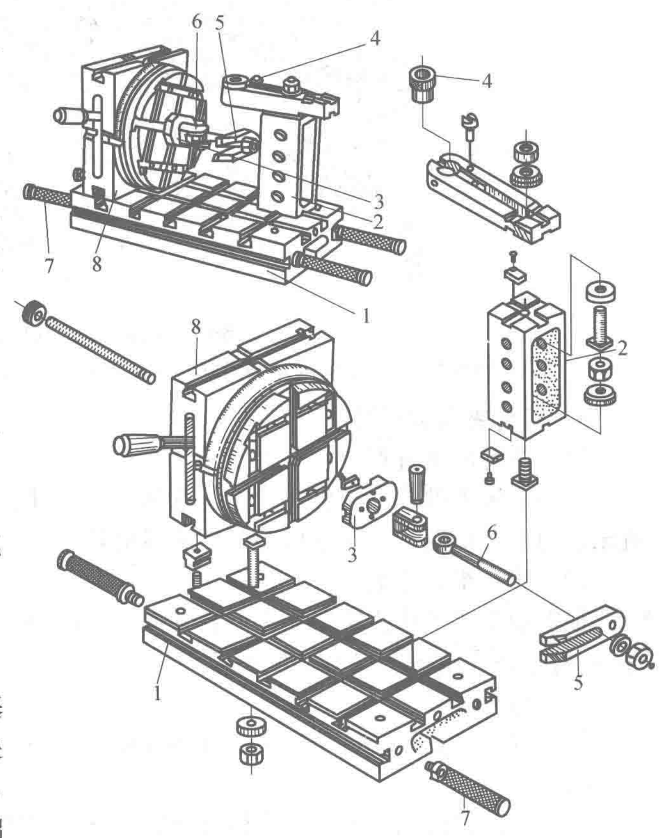


图 5-60 槽系组合夹具元件分解图

1—基础件；2—支承件；3—定位件；4—导向件；5—夹紧件；6—紧固件；7—其他件；8—合件

2. 组合夹具的类型

(1) 槽系组合夹具

夹具元件是靠基础板上的定位基准槽、键来连接各元件而组合成的夹具，所有元件可以拆卸、反复组装，重复使用。元件按其用途可分为基础件、支承件、定位件、导向件、压紧件、紧固件、合件、其他件八大类进行组合。各类元件的名称基本表示各类元件的功能，但在组装时又可以灵活地交替使用。合件是由若干元件的组合体，组装时不可拆卸。如图 5-60 所示为槽系组合夹具元件分解图。

(2) 孔系组合夹具

该系列元件结构简单，以孔与销的配合实现元件之间的定位，定位精度高。通过螺栓连接，刚性好，组装方便。如图 5-61 所示为孔系组合夹具元件分解图。

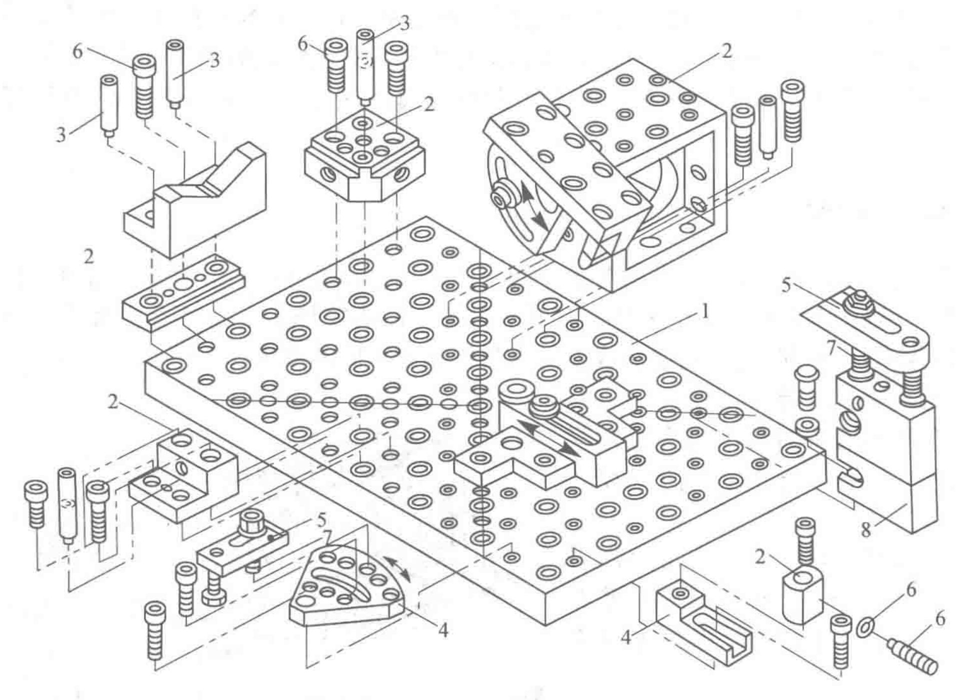


图 5-61　孔系组合夹具元件分解图

1—基础件；2—支承件；3—定位件；4—辅助；5—夹紧件；6—紧固件；7—其他件；8—合件

3. 组合夹具的组装

（1）熟悉原始资料

主要了解工件的加工要求、工件的形状、尺寸、公差和其他技术要求及加工工艺、所用机床、刀具等情况，并了解以往类似夹具的记录。

（2）确定组装方案

根据加工要求选择定位、夹紧、导向、基础等元件（其中特殊情况下要考虑设计专用元件），构思夹具结构，拟定组装方案。

（3）组装计算

如角度、坐标尺寸、结构尺寸等的计算。

（4）试装

试装就是将构思好的夹具结构方案先搭一个“样子”，用以检验构思方案是否正确可行，从而对前面设想的结构方案进行修改与补充，以免在正式组装时造成返工。此过程中常常对原方案进行反复修改。

（5）组装连接

按照预先确定好的组装方案由里到外、由上往下依次安装，并同时进行测量与调整，然后将各元件固定下来。

（6）检验

对组装好的夹具进行全面键槽，检查内容与试装时相同，最后检查零星元件是否配齐。必要时可进行试加工，以确保组装后的夹具满足加工要求。

5.7　箱体类零件的测量

1. 箱体类零件的主要检验项目

箱体类零件的主要检验项目包括：

1）各加工表面的表面粗糙度及外观。表面粗糙度检验通常用目测或样板比较法，只有当 R_a 值很小时才考虑使用光学量仪。外观检查只需根据工艺规程检查完工情况及加工表面有无缺陷即可。

2）孔与平面尺寸精度及几何形状精度。孔的尺寸精度一般用塞规检验。在需确定误差数值或单件小批生产时可用内径千分尺或内径千分表检验；若精度要求很高可用气动量仪检验。平面的直线度可用平尺和厚薄规或水平仪与桥板检验；平面的平面度可用自准直仪或水平仪与桥板检验，也可用涂色检验。

3）孔距精度。

4）孔系相互位置精度。

包括各孔同轴度、轴线间平行度与垂直度、孔轴线与平面的平行度及垂直度等。

2. 箱体类零件孔系位置精度及孔距离精度的检验

（1）孔间距和孔轴线平行度检验

如图 5-62 所示，根据孔距精度的高低，可分别使用游标卡尺或千分尺。测量出图示 a_1 和 a_2 或 b_1 和 b_2 的大小即可得出孔距 A 和平行度的实际值。使用游标卡尺时也可不用心轴和衬套，直接量出两孔母线间的最小距离。孔距精度和平行度要求严格时，也可用块规测量。为提高测量效率，可使用图中 K 向视图所示的装置，其结构与原理类似于内径千分尺。

（2）同轴度检验

一般工厂常用检验棒检验同轴度，若检验棒能自由通过同轴线上的孔，则孔的同轴度在允差之内。当孔系同轴度要求不高（允差较大）时，可用图 5-63 所示方法；若孔系同轴度允差很小时可改用专用检验棒。图 5-64 所示方法可测定孔同轴度误差具体数值。

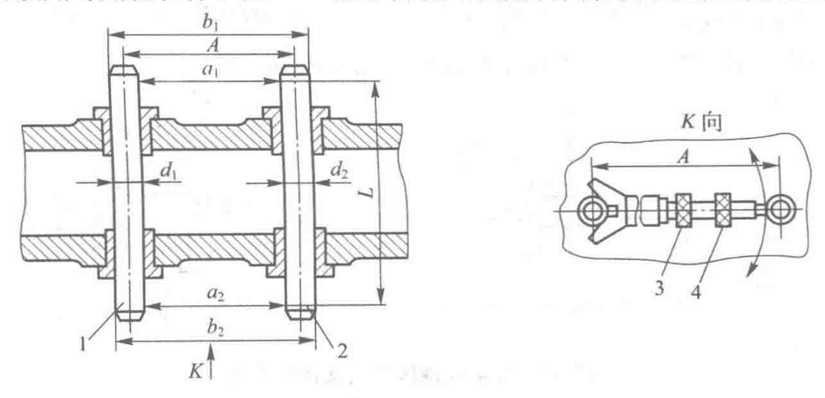


图 5-62　检验孔间距和孔轴线的平行度

1，2—标准量棒；3—锁紧螺母；4—调整螺钉（与量脚固连为一体）

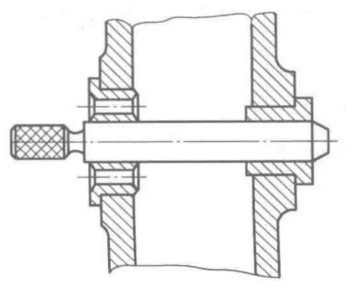


图 5-63　用通用检验棒与检验套检验同轴度

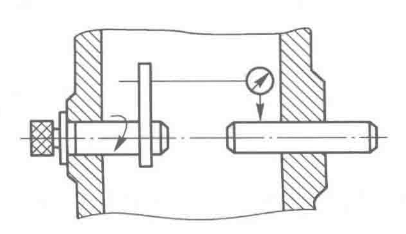


图 5-64　用专用检验棒及百分表检验同轴度偏差

（3）孔轴线对基准平面的距离和平行度检验

孔轴线对基准平面的距离和平行度的检验方法如图 5-65 所示。

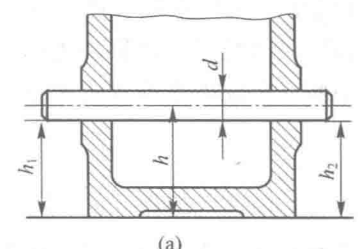


图 5-65　检验孔轴线对基准平面的距离和平行度

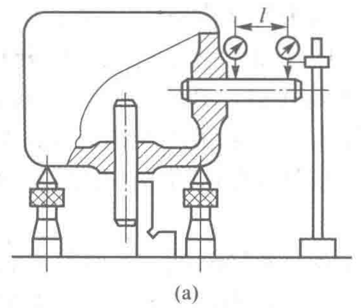
（a）距离检验；（b）平行度检验

（4）两孔轴线垂直度检验

可用图 5-66（a）或（b）所示的方法，基准轴线和被测轴线均用心轴模拟。

（5）孔轴线与端面垂直度检验

在被测孔内装模拟心轴，并在其一端装上千分表，使表的测头垂直于端面并与端面接触，将心轴旋转一周即可测出孔与端面的垂直度误差，如图 5-67（a）所示。将带有检验圆盘的心轴插入孔内，用着色法检验圆盘与端面的接触情况，或用厚薄规检查圆盘与端面的间隙 Δ，也可确定孔轴线与端面的垂直度误差，如图 5-67（b）所示。



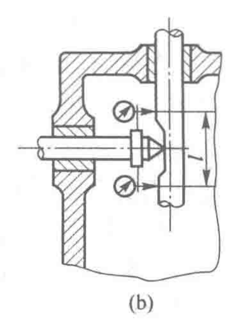
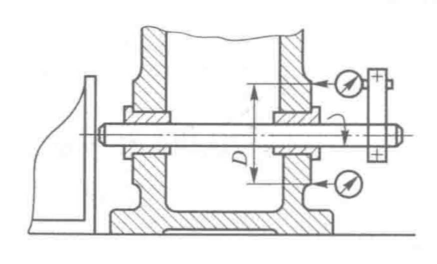


图 5-66　两孔轴线垂直度检验

（a）检验方案一；（b）检验方案二



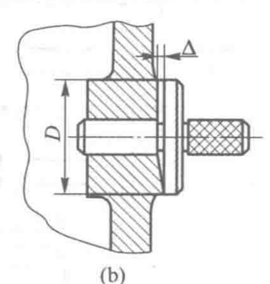


图 5-67　检验孔轴线与断面的垂直度

（a）检验方案一；（b）检验方案二

5.8 项目实施

通过学习项目二，应该掌握了工艺规程制定的基本知识，包括零件的结构工艺性分析、毛坯确定、工艺路线拟订、工序设计等内容。通过学习 5.2～5.7 节，了解了箱体类零件的功用及结构特点、技术要求以及一般箱体类零件的材料、毛坯及热处理等相关知识，掌握了箱体类零件平面和内孔表面加工方法、箱体类零件常用加工设备、常用加工刀具、保证箱体类零件孔系精度的方法、箱体类零件的检验、简单箱体类零件的加工工艺分析等要点。下面将回到 5.1 节中介绍的工作任务，根据前面学习的内容按要求完成工作任务。

5.8.1 任务分析

项目任务完成需要学生掌握机械制图、公差与配合、机械设计基础、金属工艺学等相关专业基础课程知识；需要学生掌握项目二机械加工工艺规程设计，项目三、四轴套类零件孔加工方法、加工设备、加工刀具等知识点，并且需要学生已经经历了利用手动工具加工零件、利用普通机床加工零件等金工实践环节。在此基础上还需要掌握以下知识：

1）箱体类零件的加工方法。

2）箱体类零件常用的加工设备。

3）箱体类零件常用的加工刀具。

4）保证箱体类零件孔系精度的方法。

5）箱体类零件的检验。

6）典型箱体类零件的加工工艺分析。

5.8.2 工作计划

在项目实训过程中，结合创设情景、观察分析、现场参观、讨论比较、案例对照和评估总结等活动，充分调动学生学习的主动性和积极性，让学生自主地学习、主动地学习。各小组协同制订实施计划及执行情况见表 5-2，共同解决实施过程中遇到的困难；要相互监督计划执行与完成的情况，保证项目完成的合理性和正确性。

表 5-2 车床主轴箱零件加工工艺编制计划及执行情况表

序号	内 容	要 求	教学组织与方法
1	研讨任务	根据给定的零件图样、任务要求，分析任务完成需要掌握的相关知识	分组讨论，采用任务引导法教学
2	计划与决策	企业参观实习、项目实施准备、制订项目实施详细计划、学习与项目相关的基础知识	分组讨论、集中授课，采用案例法和示范法教学
3	实施与检查	根据计划，分组讨论并审查车床开合螺母外壳零件图样的工艺性；分组讨论并确定螺母外壳毛坯类型、机械加工顺序；选择 2～3 个重要工序，分析讨论并确定工序内容	分组讨论、教师点评

续表

序号	内　容	要　求	教学组织与方法
4	项目评价与讨论	(1) 评价中间壳零件加工工艺分析的充分性、正确性 (2) 评价零件毛坯选择的正确性 (3) 评价工艺规程编制的规范性与可操作性 (4) 评价重要工序内容确定的正确性与合理性 (5) 评价检测方法是否规范；是否形成检验记录；产品是否符合零件图样要求 (6) 评价学生的职业素养和团队精神	项目评价法实施评价

5.8.3 实施过程

1. 对零件进行工艺分析

(1) 分组分析零件图样

中间泵壳零件图样的视图正确、完整，尺寸、公差及技术要求齐全。加工表面主要有侧面、端面、孔系、内孔、螺纹孔。

根据分析，本零件各表面的加工并不困难，零件结构工艺性较好。

讨论问题：

1) 8E160C-J 中间泵壳零件装在机油泵部件的哪部分？起什么作用？

2) 8E160C-J 中间泵壳零件有哪些加工表面？分别采用何种加工方案？

2. 选择毛坯

从零件图样获知，泵壳结构较复杂，以承压为主，要求有良好的刚度、减振性和密封性，因零件材料为 HT250，零件毛坯可选择砂型机器造型铸造成形。

毛坯尺寸及公差可由《机械制造工艺设计简明手册》中查得铸件尺寸公差（GB 6414—1986）等级为 IT8～IT10，可取 IT9；铸件机加工余量（GB/T 11351—1989）等级为 G；可获得铸件各加工表面的加工余量；铸造孔的最小尺寸为 30mm；铸造斜度，一般砂型取 3°；圆角半径，为方便侧面孔加工取 R_7 或 R_9。

毛坯的外形由零件图样决定。

讨论问题：

8E160C-J 中间泵壳零件可选用哪些毛坯？如何确定毛坯余量？

3. 拟定工艺过程

(1) 定位基准的选择

1) 粗基准选择。为保证加工表面余量合理分配，选侧面（H 面）为粗基准。

2) 精基准选择。按基准统一原则，孔系加工时选侧面（H 面）为精基准，两端面加工时选内孔及侧面（H 面）为精基准；按互为基准原则，内孔加工时选侧面（H 面）为基准，侧面加工时选内孔为基准。

(2) 零件表面加工方法选择

根据零件图样，加工表面主要有侧面、端面、孔系、内孔、螺纹孔。

1) 两侧面。尺寸精度为 $85^{+0.05}_{+0.002}$，$R_a0.8\mu m$，需铣—磨削。

2) 两端面。80±0.10mm，90±0.10mm，$R_a6.3\mu m$，铣削即可。

3）孔系。R_a12.5μm，位置度靠钻模保证，对应钻头直接钻出。

4）M22螺纹。M22×1.5—6H，R_a 12.5μm；ϕ20H7，R_a 1.6μm；ϕ14mm，R_a 12.5μm；

其加工方法可分为钻 ϕ14mm 孔，扩 ϕ19.7mm 孔，铰 ϕ20mm 孔，R_a 1.6μm，扩 ϕ20.5mm 螺纹孔，研配后攻螺纹。

5）内孔。$\phi 63.37^{+0.146}_{+0.10}$ mm，R_a 1.6μm 即可。需粗镗—精镗。ϕ36mm，R_a 12.5μm，粗镗即可。

（3）工艺路线拟订

机械加工工艺参考方案见表5-3。

（4）填写机械加工工艺过程卡

学生应按机械工业部指导性技术文件 JB/Z 388.5《工艺管理导则工艺规程设计》标准格式填写。

讨论问题：

1）8E160C-J 中间泵壳零件加工时采用哪个面为精基准？哪个面为粗基准？

2）$\phi 63.37^{+0.146}_{+0.10}$ mm 内孔表面采用钻、扩、镗哪种加工方法？为什么？

3）8E160C-J 中间泵壳零件的工艺方案有几种？哪种为最佳方案？为什么？

4. 实施

在条件许可情况下，委托生产企业操作工根据学生编制的工艺过程卡、工序卡加工零件，由同学对加工后的零件实施测量，判断零件的合格状况。

需要填写的工艺过程文件主要有机械加工工艺过程卡片，如中间泵壳机械加工工艺过程卡（见表5-3）。具体的任务实施检查与评价见表5-4。

讨论问题：

判断零件合格与否的依据是什么？该零件合格吗？若为不合格品产生的原因是什么？

表5-3 中间泵壳零件机械加工工艺过程卡片

<table>
<tr><td colspan="3" rowspan="2"></td><td colspan="2" rowspan="2">机械加工工艺过程卡</td><td>产品型号</td><td colspan="2">8E160C-J</td><td colspan="2">零（部）件图号</td><td colspan="2">8-HJl0000</td></tr>
<tr><td>产品名称</td><td colspan="2">中间泵壳</td><td colspan="2">零（部）件图号</td><td colspan="2">8-HJl0009</td></tr>
<tr><td>材料牌号</td><td>HT250</td><td>毛坯种类</td><td>铸件</td><td>毛坯尺寸</td><td></td><td colspan="2">每毛坯可制件数</td><td>1</td><td>每台件数</td><td colspan="2">1</td></tr>
<tr><td rowspan="2">工序号</td><td rowspan="2">工序名称</td><td colspan="3" rowspan="2">工序内容</td><td rowspan="2">车间</td><td rowspan="2">设备</td><td colspan="3">工艺设备</td><td colspan="2">工 时</td></tr>
<tr><td>夹具</td><td>刀具</td><td>量具</td><td>准终</td><td>单件</td></tr>
<tr><td>10</td><td></td><td colspan="3">铸造</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>20</td><td>热</td><td colspan="3">时效</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>30</td><td></td><td colspan="3">漆底漆</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>40</td><td>检</td><td colspan="3">铸件按 Q/TYC28 技术条件验收</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>50</td><td>铣</td><td colspan="3">（1）打面为粗基准，铣一端侧面
（2）以加工好的一端侧面为基准，铣另一端侧面（H面），控制尺寸为85.5mm</td><td>金工</td><td>X53K</td><td>铣两侧面夹具</td><td>ϕ140铣刀</td><td>游标卡尺 0～125/0.02</td><td></td><td></td></tr>
</table>

续表

工序号	工序名称	工序内容	车间	设备	工艺设备			工时	
					夹具	刀具	量具	准终	单件
60	镗	以片面为定位基准 （1）粗镗 2-$\phi63.37^{+0.146}_{+0.100}$ 至 ϕ62mm，中心距至 54.630±0.015mm （2）粗镗 2-R18mm 孔至图样要求	金工	X53K	镗孔夹具	ϕ40 镗刀杆 ϕ32 镗刀杆	内径百分表 50～100/0.01		
70	铣	以 H 面、2-ϕ62mm 为定位基准 （1）铣一端面，尺寸至图样要求 （2）钻孔 ϕ30mm，深 50mm （3）铣另一端面，尺寸至图样要求 （4）钻孔 ϕ32mm，深 40mm （5）钻螺纹底孔 ϕ6.5mm	金工	X53K	铣两端面夹具、钻夹具	ϕ85 三面刃铣刀、ϕ32，ϕ30，ϕ6.5 钻头	内径百分表 50～100/0.01、游标卡尺 0～125/0.02		
80	攻螺纹	攻螺纹 3×M8－6H	金工	折臂攻丝机	攻螺纹夹具	机用丝锥 M8－6H	螺纹塞规		
90	钻	以 H 面、2-ϕ62mm 为定位基准 钻 ϕ14mm、深 80mm； 扩 ϕ19.7mm、深 46mm； 铰 ϕ20H7mm、深 46mm； 扩 ϕ20.5mm、深 25mm； 120°研配； 攻螺纹 M22×1.5－6H 深 25mm	金工	Z535	钻夹具	ϕ14 麻花钻、ϕ19.7，ϕ20.5 锥柄扩孔钻、ϕ20 铰刀、ϕ22 丝锥	光滑塞规、游标卡尺 0～125/0.02		
100	钻	以 H 面、2-ϕ62mm 为定位基准 （1）钻端面孔 6-ϕ9mm （2）钻端面孔水 4mm，35mm	金工	Z535	钻夹具	ϕ9，ϕ14 麻花钻头	光滑塞规、游标-E 尺 0～125/0.02		
110	镗	以 H 面为定位基准精镗 2-$\phi63.37^{+0.146}_{+0.100}$mm 孔	金工	X53K	镗夹具	ϕ40 镗刀杆	内径百分表 50～100/0.01		
120	磨	精磨一侧面；精磨 H 面	金工	M7120A		WA60L 350×40×127	外径千分尺 50～75/0.01、表面粗糙度比较样板		
130	检	检验							

5.8.4 任务评价

任务实施检查与评价表见表 5-4。

表 5-4 任务实施检查与评价表

<table>
<tr><th>序号</th><th colspan="2">检查内容</th><th>检查记录</th><th>评价</th><th>分值</th></tr>
<tr><td>1</td><td colspan="2">零件图样识别是否充分，结构工艺分析是否正确，是否形成记录</td><td></td><td></td><td>5%</td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="2">零件毛坯选择的可行性与正确性（毛坯图）</td><td></td><td></td><td>10%</td></tr>
<tr><td>3</td><td colspan="2">零件加工顺序制订的合理性与可行性（机械加工工艺过程卡）</td><td></td><td></td><td>20%</td></tr>
<tr><td>4</td><td colspan="2">重要工序内容确定的正确性与合理性（机械加工工序卡）</td><td></td><td></td><td>35%</td></tr>
<tr><td rowspan="4">5</td><td rowspan="4">职业素养</td><td>遵守时间：是否不迟到，不早退，中途不离开现场</td><td></td><td></td><td>10%</td></tr>
<tr><td>5S：理实一体现场是否符合 5S 管理要求，桌椅、参考资料是否按规定摆放，地面、门窗是否干净</td><td></td><td></td><td>10%</td></tr>
<tr><td>团结协作：组内是否配合良好；是否积极投入到本项目中积极完成本任务</td><td></td><td></td><td>5%</td></tr>
<tr><td>语言能力：是否积极回答问题；声音是否洪亮；条理是否清晰</td><td></td><td></td><td>5%</td></tr>
<tr><td>总评</td><td colspan="2"></td><td colspan="3">评价人</td></tr>
</table>

5.9 拓展项目

5.9.1 任务案例

图 5-68 所示为某一车床主轴箱零件简图，试拟订该零件小批生产、大批生产的机械加工工艺过程。

5.9.2 任务要求

编制车床主轴箱的机械加工工艺过程卡。通过车床主轴箱零件小批生产、大批生产工艺路线的拟订，使学生进一步对箱体类零件工艺规程的编制等有所理解和体会，增强学生的学习兴趣，提高学生解决工程技术问题的自信心，体验成功的喜悦；通过项目任务教学，培养学生互助合作的团队精神。

5.9.3 项目实施

1. 主轴箱箱体的结构特点及技术条件分析

主轴箱是整体式箱体中结构较为复杂、要求又高的一种箱体，且壁厚不均匀，加工的难度较大，箱体上大都有较多孔，其尺寸、形状和相互位置精度要求都比较高。主轴支承孔精度为 IT6，表面粗糙度值 R_a 为 1.6～0.8μm，其他支承孔精度为 IT7～IT6，表面粗糙度值

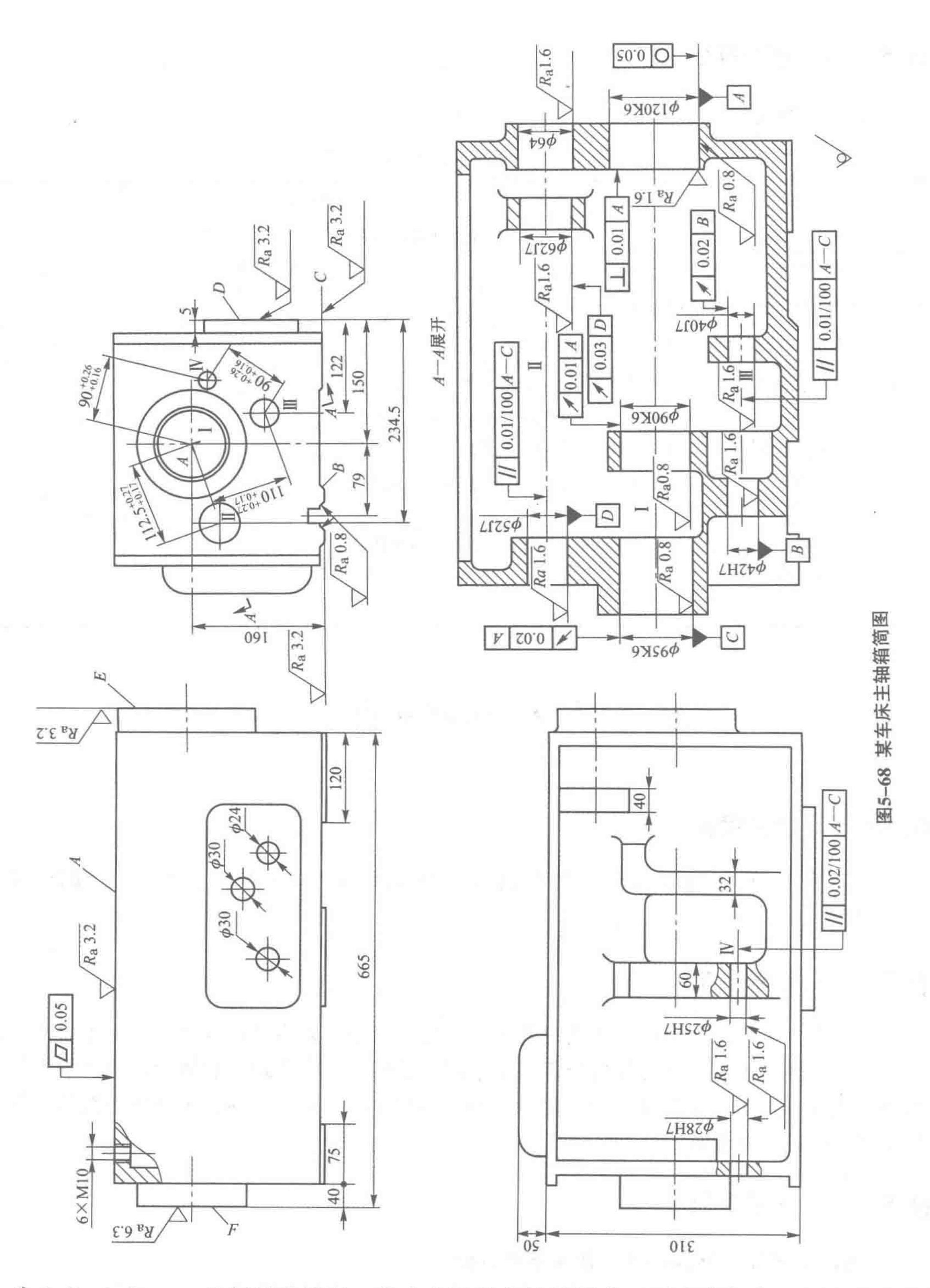


图5-68 某车床主轴箱简图

R_a 为 3.2～1.6 μm。几何形状精度一般应在孔的公差范围内，要求高的应不超过孔公差的 1/3。箱体的主要平面就是装配基面或加工中的定位基面，它们直接影响箱体与机器总装时的相对位置及接触刚性，影响箱体加工中的定位精度，因而有较高的平面和表面粗糙度要

求。一般机床箱体装配基面和定位基面的平面度允差在 0.03～0.1mm 范围内，表面粗糙度值 R_a 为 3.2～1.6 μm。其他平面也有相应的精度要求，如一般平面间的平行度允差在 0.05～0.2 mm/全长范围内；平面间的垂直度约为 0.1 mm/300 mm 左右。

2. 主轴箱箱体零件加工工艺过程分析

(1) 定位基准的选择

1) 粗基准的选择。箱体类零件的粗基准一般都用它上面的重要孔作粗基准，这样不仅可以较好地保证重要孔及其他各轴孔的加工余量均匀，还能较好地保证各轴孔轴心线与箱体不加工表面的相互位置。虽然箱体类零件一般都选择重要孔（如主轴孔）作为粗基准，但因生产类型不同，实现以主轴孔为粗基准的工件装夹方式是不同的。

中小批量生产时，由于毛坯精度较低，一般采用划线装夹，其方法如下：

首先将箱体用千斤顶安放在平台上（见图 5-69 (a)），调整千斤顶，使主轴孔Ⅰ和 A 面与台面基本平行，D 面与台面基本垂直，根据毛坯的主轴孔划出主轴孔的水平轴线Ⅰ—Ⅰ，在四个面上都要划出，作为第一校正线。划此线时，应根据图样要求，检查所有的加工部位在水

平方向是否都有加工余量，如果有加工部位没有加工余量，则需要重新调整线的位置，直到所有部位均有加工余量，才最终将Ⅰ—Ⅰ线确定下来。Ⅰ—Ⅰ线确定之后，划出 A 面和 C 面的加工线。然后将箱体翻转 90°，D 面一端置于三个千斤顶上，调整千斤顶，使Ⅰ—Ⅰ线与台面垂直（用角尺在两个方向上校正），根据毛坯的主轴孔并考虑各加工部位在垂直方向的加工余量，按照上述方法划出主轴孔的垂直轴线Ⅱ—Ⅱ作为第二校正线（图 5-69 (b)），同样四个面上都要划出。依据Ⅱ—Ⅱ线划出 D 面加工线。再将箱体翻转 90°（见图 5-69 (c)），将正面一端置于三个千斤顶上，调整千斤顶，使Ⅰ—Ⅰ线和Ⅱ—Ⅱ线与台面垂直。根据凸台高度尺寸，先划出 F 面，然后划出 E 面加工线。

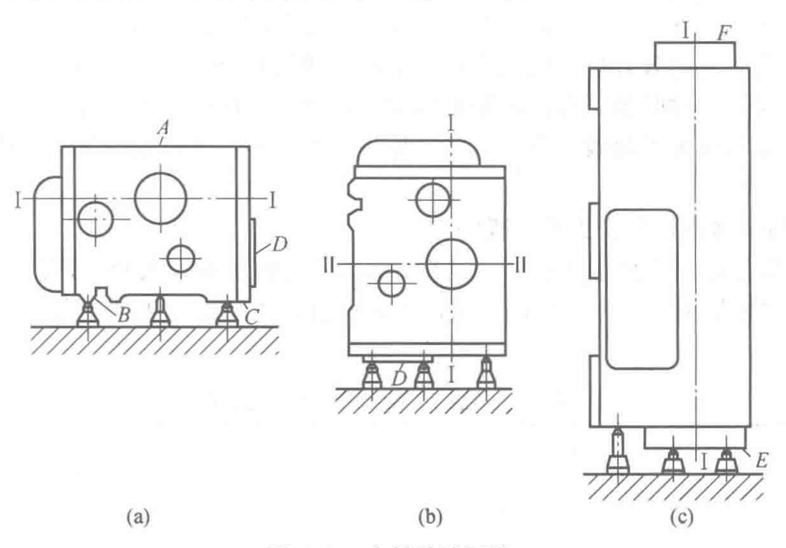


图 5-69 主轴箱的划线

加工箱体平面时，按线找正装夹工件，这样就体现以主轴孔为粗基准。

大批量生产时，由于毛坯精度较高，可直接以主轴孔在夹具上定位，采用专用夹具装夹。

2）精基准的选择。箱体加工精基准的选择也与生产批量大小有关，单件小批生产用装配基面做定位基准。图 5-68 所示车床主轴箱单件小批加工孔系时，选择箱体底面导轨 B，C 面做定位基准，B，C 面既是床头箱的装配基准，又是主轴孔的设计基准，并与箱体的两端面、侧面及各主要纵向轴承孔在相互位置上有直接联系，故选择 B，C 面作定位基准，不仅消除了主轴孔加工时的基准不重合误差，而且用导轨面 B，C 定位稳定可靠，装夹误差较小，加工各孔时，由于箱口朝上，所以更换导向套、安装调整刀具、测量孔径尺寸、观察加工情况等都很方便。

（2）加工顺序的安排

1）加工顺序为先面后孔。箱体类零件的加工顺序均为先加工面，以加工好的平面定位，再来加工孔。因为箱体孔的精度要求高，加工难度大，先以孔为粗基准加工平面，再以平面为精基准加工孔，这样不仅为孔的加工提供了稳定可靠的精基准，同时还可以使孔的加工余量较为均匀。由于箱体上的孔分布在箱体各平面上，先加工好平面，钻孔时，钻头不易引偏，扩孔或绞孔时，刀具也不易崩刃。

2）加工阶段粗、精分开。箱体的结构复杂，壁厚不均，刚性不好，而加工精度要求又高，故箱体重要加工表面都要划分粗、精加工两个阶段，这样可以避免粗加工造成的内应力、切削力、夹紧力和切削热对加工精度的影响，有利于保证箱体的加工精度。粗、精分开也可及时发现毛坯缺陷，避免更大的浪费；同时还能根据粗、精加工的不同要求来合理选择设备，有利于提高生产率。

3）工序间合理按排热处理。箱体零件的结构复杂，壁厚也不均匀，因此，在铸造时会产生较大的残余应力。为了消除残余应力，减少加工后的变形和保证精度的稳定，所以，在铸造之后必须安排人工时效处理。人工时效的工艺规范为，加热到 500～550℃，保温 4～6h，冷却速度小于或等于 30℃/h，出炉温度小于或等于 200℃。普通精度的箱体零件，一般在铸造之后安排一次人工时效出理。对一些高精度或形状特别复杂的箱体零件，在粗加工之后还要安排一次人工时效处理，以消除粗加工所造成的残余应力。有些精度要求不高的箱体零件毛坯，有时不安排时效处理，而是利用粗、精加工工序间的停放和运输时间，使之得到自然时效。箱体零件人工时效的方法，除了加热保温法外，也可采用振动时效来达到消除残余应力的目的。

3. 主轴箱箱体零件加工工艺过程的制订

表 5-5 为该主轴箱小批生产的工艺过程；表 5-6 为该主轴箱大批生产的工艺过程。从这 2 个表所列的箱体加工工艺过程可以看出，不同批量箱体加工的工艺过程，既有共性，又有各自的特性。

表 5-5　某主轴箱小批生产工艺过程

序号	工序内容	定位基准
1	铸造	
2	时效	
3	漆底漆	
4	划线：考虑主轴孔有加工余量，并尽量均匀。划 C，A 及 E，D 加工线	

续表

序号	工序内容	定位基准
5	粗、精加工顶面 A	按线找正
6	粗、精加工 B，C 面及侧面 D	顶面 A 并校正主轴线
7	粗、精加工两端面 E，F	B，C 面
8	粗、半精加工各纵向孔	B，C 面
9	精加工各纵向孔	B，C 面
10	粗、精加工横向孔	B，C 面
11	加工螺孔及各次要孔	
12	清洗、去毛刺倒角	
13	检验	

表 5-6　某主轴箱大批生产工艺过程

序号	工序内容	定位基准
1	铸造	
2	时效	
3	漆底漆	
4	铣顶面 A	Ⅰ孔与Ⅱ孔
5	钻、扩、绞 2-ϕ8H7 工艺孔（将 6-M10mm 先钻至 ϕ7.8mm，绞 2-ϕ8H7）	顶面 A 及外形
6	铣两端面 E，F 及前面 D	顶面 A 及两工艺孔
7	铣导轨面 B，C	顶面 A 及两工艺孔
8	磨顶面 A	导轨面 B，C
9	粗镗各纵向孔	顶面 A 及两工艺孔
10	精镗各纵向孔	顶面 A 及两工艺孔
11	精镗主轴孔Ⅰ	顶面 A 及两工艺孔
12	加工横向孔及各面上的次要孔	
13	磨 B，C 导轨面及前面 D	顶面 A 及两工艺孔
14	将 2-ϕ8H7 及 4-ϕ7.8mm 均扩钻至 ϕ8.5mm，攻 6-M10mm	
15	清洗、去毛刺倒角	
16	检验	

习题

1. 说明箱体零件的功用和主要工作表面。
2. 箱体类零件的加工顺序应怎样安排？
3. 铣削加工可完成哪些工作？铣削加工有何特点？
4. 说明卧式万能铣床的部件名称与作用。

5. 什么是顺铣？什么是逆铣？试比较其优、缺点并说明适用场合。
6. 刨削加工有何特点？刨削应用范围如何？
7. 在箱体平行孔系加工中如何保证孔系之间的孔距精度？
8. 在箱体同轴孔系加工中如何保证同轴孔系的同轴度？
9. 在箱体交叉孔系加工中如何控制有关孔的垂直度？
10. 箱体零件的主要检验项目有哪些？孔系位置精度和孔距精度如何检验？
11. 箱体类零件平面磨削加工中常见的问题及解决的办法有哪些？
12. 箱体类零件的热处理工序怎样安排？
13. 试归纳总结各种孔加工方法的工艺特点及其适应性。
14. 试拟订图 5-70 所示车床主轴箱零件的加工工艺路线。

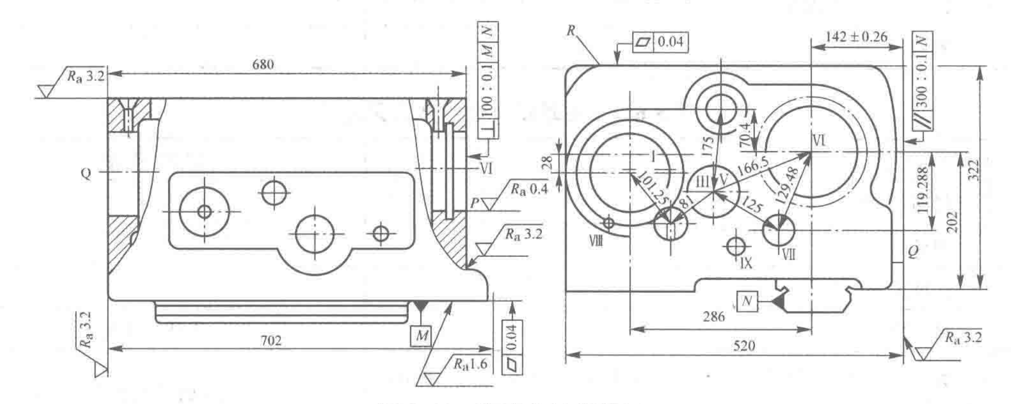


图 5-70 车床主轴箱简图

项目六 齿轮类零件加工工艺

【知识点】

- 了解一般齿轮类零件的功用及加工特点，技术要求；
- 了解齿轮类零件的材料、毛坯及热处理；
- 掌握齿轮类零件的加工方法、加工设备与刀具；
- 掌握齿轮类零件的加工工艺过程。

【技能点】

- 掌握齿轮类零件毛坯的选择方法；
- 具备分析齿轮类零件加工工艺的能力；
- 能够制定典型齿轮类零件的工艺路线；
- 初步具备编制简单零件工艺过程卡的能力。

6.1 项目导入

1. 任务案例

成批生产普通精度的齿轮，如图 6-1 所示。制定该齿轮的机械加工工艺规程，主要技术要求如下所述。

2. 任务要求

1）审查齿轮零件图样，对其进行工艺分析。

2）选择零件毛坯。

3）选择加工方法，确定加工顺序。

4）选择定位基准，编制工艺过程。

3. 任务引导

1）仔细阅读齿轮零件图，回顾 2.3 节知识点——零件的工艺性分析，检查零件图的完整性和正确性。根据实际制造能力分析审查零件的结构、尺寸精度、形位精度、表面粗糙度、材料及热处理等技术要求是否合理，是否便于加工以及加工的经济性。

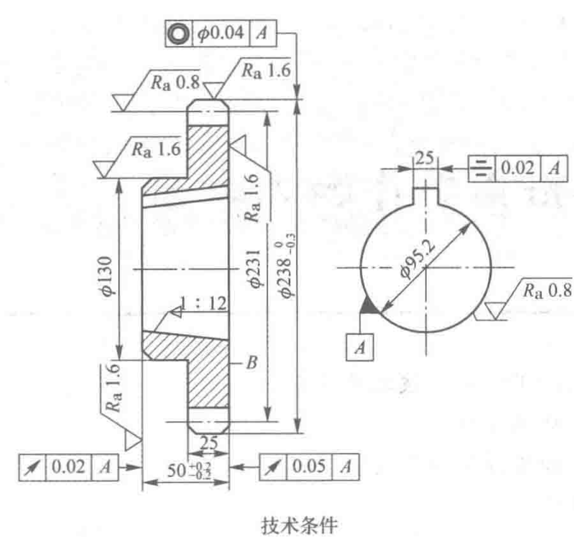
2）回顾 2.4 节知识点——毛坯的选择，如何选择车床齿轮零件毛坯？

3）齿轮类零件的功用、结构特点、技术要求、材料、毛坯及热处理要求有哪些？

4）齿轮类零件平面的加工方法有哪些？如何选择？

5）齿轮类零件平面的加工设备和刀具有哪些？如何选择？

6）齿轮类零件的主要检验项目有哪些？



模　　数	m=3.5mm
齿　　数	z=66
齿形角	α=20°
变位系数	x=0
精度等级	7-6-6KM GB10095—88
公法线长度变动公差	F_w=0.036 mm
径向综合公差	F_i''=0.08 mm
一齿径向综合公差	f_i''=0.016 mm
齿向公差	F_β=0.009 mm
公法线平均长度	$W=80.72^{-0.14}_{-0.19}$ mm

技术条件

1.1：12 锥度塞规检查，接触面不少于 75%。
2. 材料：45 钢。
3. 热处理：齿部 54HRC。

图 6-1　某齿轮简图

7）如何检验箱体类零件孔系位置精度及孔距精度？

8）企业生产参观实习。

• 生产现场加工哪些齿轮类零件？批量如何？采用什么毛坯？

• 生产现场各种齿轮类零件加工工艺有何特点？一般使用什么机床加工？

6.2　齿轮类零件工艺分析

6.2.1　圆柱齿轮的功用和结构特点

齿轮是用来传递运动和动力的重要零件，目前大多数机械都应用它。常用的齿轮有圆柱齿轮、圆锥齿轮及蜗轮等，以圆柱齿轮应用最广，其功用是按照一定的速比传递运动和动力。齿轮的结构因其使用要求不同而具有各种不同的形状和尺寸，但从工艺观点大体上可以分为齿圈和轮体两部分。按照齿圈上轮齿的分布形式，可分为直齿、斜齿和人字齿轮等；按照轮体的结构特点，圆柱齿轮可大致分为盘形齿轮、套筒齿轮、轴齿轮和齿条等。如图 6-2 所示，其中盘类齿轮应用最广。

6.2.2　齿轮传动的精度要求

齿轮本身的制造精度，对整个机器的工作性能、承载能力及使用寿命都有很大影响。根据其使用条件，齿轮传动应满足以下要求：

1）传动的准确性。即主动齿轮转过一个角度时，从动齿轮应按给定的速比转过相应的角度。要求齿轮在一转中，转角误差的最大值不能超过一定的限度。

2）工作平稳性。要求齿轮传动平稳，无冲击，振动和噪声小，这就需要限制齿轮传动时，瞬时传动比的变化，即限制齿轮在转过一个齿形角的转角误差。

3）载荷均匀性。要求齿轮工作时，齿面接触要均匀，以使齿轮在传递动力时不致因载荷分布不均而使接触应力集中，引起齿面过早磨损。

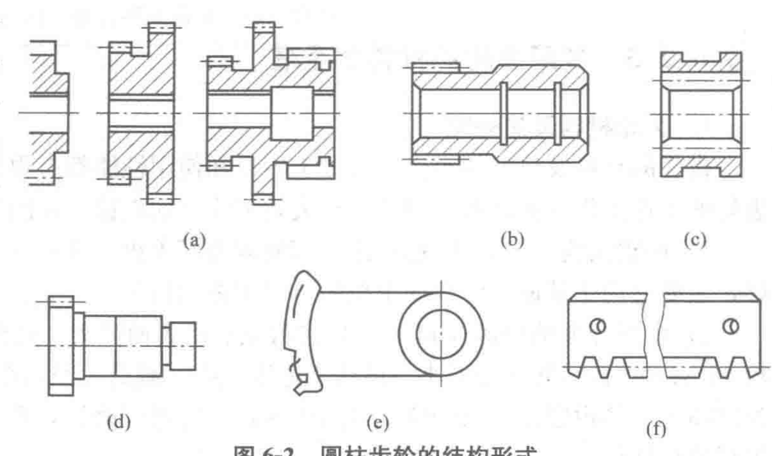


图 6-2　圆柱齿轮的结构形式

(a) 盘类齿轮；(b) 套类齿轮；(c) 内齿轮；
(d) 轴类齿轮；(e) 扇形齿轮；(f) 齿条

4）齿侧间隙。一对相互啮合的齿轮，其齿面间必须留有一定的间隙，即为齿侧间隙，其作用是贮存润滑油，使齿面工作时减少磨损；同时可以补偿热变形、弹性变形、加工误差和安装误差等因素引起的齿侧间隙减小，防止卡死。应当根据齿轮副的工作条件，来确定合理的齿侧间隙。

国家标准 GB10095—88《渐开线圆柱齿轮精度》对齿轮、齿轮副规定了 12 个精度等级，其中第 1 级最高，第 12 级最低。标准将齿轮每个精度等级的各项公差与极限偏差分成三个公差组，具体见表 6-1。

表 6-1　各公差组对传动性能的主要影响

公差组	公差与极限偏差项目	对传动性能的主要影响	特点
Ⅰ	齿圈径向跳动公差 F_r	传递运动的准确性	以齿轮转 1 转为周期的误差
	径向综合公差 F_i''		
	公法线长度变动公差 F_w		
	切向综合公差 F_i'		
	齿距累积公差 F_p k 个齿距累计公差 F_{pk}		
Ⅱ	基节极限偏差 $\pm f_{pb}$	传动的平稳性、噪声、振动	在齿轮 1 周内多次周期重复出现的误差
	齿形公差 f_f		
	齿距极限偏差 $\pm f_{pt}$		
	螺旋线波度公差 $f_{f\beta}$（斜齿轮）		
	1 个齿径向综合公差 f_i''		
	1 个齿切向综合公差 f_i'		
Ⅲ	齿向公差 F_β	载荷分布的均匀性	齿向线的误差
	F_i''　F_{pF}''　F_{pk}　F_i　F_r　F_w		
	公差与极限偏差项目		

6.2.3 常用齿轮的材料和毛坯

1. 齿轮材料及热处理

齿轮的材料及热处理对齿轮的加工质量和使用性能都有很大的影响，选择时应主要考虑齿轮的工作条件（如速度与载荷）和失效形式（如点蚀、折断等）。

1）中碳结构钢（如45钢）进行调质或表面淬火，这种钢经热处理后，综合力学性能较好，主要适用于低速、轻载或中载的一般用途的齿轮。

2）中碳合金结构钢（如40Cr）进行调质或表面淬火，这种钢经热处理后综合力学性能较45钢好，且热处理变形小。适用于速度较高、载荷大及精度较高的齿轮。某些高速齿轮，为提高齿面的耐磨性，减少热处理后变形，不再进行磨齿，可选用氮化钢（如38CrMoAlA）进行氮化处理。

3）渗碳钢（如20Cr和20CrMnTi等）进行渗碳或碳氮共渗，这种钢经渗碳淬火后，齿面硬度可达HRC58～63，而心部又有较高的韧性，既耐磨又能承受冲击载荷，适用于高速、中载或有冲击载荷的齿轮。

4）铸铁及其他非金属材料（如夹布胶木与尼龙等），这些材料强度低，容易加工，适用于一些较轻载荷下的齿轮传动。

2. 齿轮毛坯

齿轮毛坯的选择取决于齿轮的材料、结构形状、尺寸大小、使用条件以及生产批量等多种因素。毛坯形式主要有棒料、锻件、铸件。棒料用于小尺寸、结构简单而且对强度要求低的齿轮。锻件多用于齿轮要求强度高、耐冲击和耐磨。当齿轮直径大于600mm时，常用铸造方法铸造齿坯。为了减少机械加工量，对大尺寸、低精度齿轮，可以直接铸出轮齿；压力铸造，精密铸造、粉末冶金、热扎和冷挤等新工艺，可制造出具有轮齿的齿坯等新工艺，可制造出具有轮齿的齿坯，以提高劳动生产率，节约原材料。

3. 齿坯的加工

齿坯加工，在齿轮的整个加工过程中占有重要的位置。齿轮的孔、端面或外圆常作为齿形加工的定位、测量和装配的基准，其加工精度对整个齿轮的精度有着重要的影响。另外，齿坯加工在齿轮加工总工时中占有较大的比例，因此齿坯加工在整个齿轮加工中占有重要的地位。

（1）齿坯加工精度

齿轮在加工、检验和装夹时的径向基准面和轴向基准面应尽量一致。一般情况下，以齿轮孔和端面为齿形加工的基准面，所以齿坯精度中主要是对齿轮孔的尺寸精度和形状精度、孔和端面的位置精度有较高的要求；当外圆作为测量基准或定位、找正基准时，对齿坯外圆也有较高的要求。具体见表6-2和表6-3。

表6-2 齿坯尺寸和形状

齿坯精度等级	4	5	6	7	8	9	10
孔的尺寸和形状公差	IT4	IT5	IT6	IT7		IT8	
轴的尺寸和形状公差	IT4	IT5		IT6		IT7	
顶圆直径公差	IT7		IT8			IT9	

表 6-3 齿坯基准面径向和端面圆跳动公差

分度圆直径/mm		精度等级						
大于	到	4	5	6	7	8	9	10
—	125	7	11		18		28	
125	400	9	14		22		36	
400	800	12	20		32		50	

（2）齿坯加工方案

齿坯加工工艺方案主要取决于齿轮的轮体结构、技术要求和生产类型。齿坯加工的主要内容有齿坯的孔、端面、顶尖孔（轴类齿轮）以及齿圈外圆和端面的加工。对于轴类齿轮和套筒齿轮的齿坯，其加工过程和一般轴、套类基本相同，以下主要讨论盘类齿轮齿坯的加工工艺方案。

1）单件小批生产的齿坯加工。一般齿坯的孔、端面及外圆的粗、精加工都在通用车床上经两次装夹完成，但必须注意将孔和基准端面的精加工在一次装夹内完成，以保证位置精度。

2）成批生产的齿坯加工。成批生产齿坯时，经常采用“车—拉—车”的工艺方案。

a. 以齿坯外圆或轮毂定位，粗车外圆、端面和内孔。

b. 以端面定位拉孔。

c. 以孔定位精车外圆及端面等。

3）大批量生产的齿坯加工。大批量生产，应采用高生产率的机床和高效专用夹具加工。在加工中等尺寸齿轮齿坯时，均多采用“钻—拉—多刀车”的工艺方案。

a. 以毛坯外圆及端面定位进行钻孔或扩孔。

b. 拉孔。

c. 以孔定位在多刀半自动车床上粗、精车外圆、端面、车槽及倒角等。

6.3 齿形加工方法

一个齿轮的加工过程是由若干工序组成的。为了获得符合精度要求的齿轮，整个加工过程都是围绕着齿形加工工序服务的。齿形加工方法可分为无屑加工和切削加工两类。无屑加工主要有热扎、冷扎、压铸、注塑、粉末冶金等，无屑加工生产率高，材料消耗小，成本低，但由于受到材料塑性和加工精度低的影响，目前尚未广泛应用。齿形切削加工精度高，应用广，按照加工原理，可分为成形法和展成法。成形法采用与被加工齿轮齿槽形状相同的刀刃的成形刀具来进行加工，常用的有指状铣刀铣齿、盘形铣刀铣齿、齿轮拉刀拉拉齿和成形砂轮磨齿。展成法是使齿轮刀具和齿坯严格保持一对齿轮啮合的运动关系来进行加工，如滚齿、插齿、剃齿、珩齿、挤齿和磨齿等。

齿形加工是整个齿轮加工的核心。尽管齿轮加工有许多工序，但都是为齿形加工服务，其目的在于最终获得符合精度要求的齿轮。

6.3.1 齿形加工方案的选择

齿形加工方案的选择，主要取决于齿轮的精度等级，结构形状、生产类型和齿轮的热处理方法及生产工厂的现有条件，对于不同精度等级的齿轮，常用的齿形加工方案如下：

（1）8 级或 8 级精度以下的齿轮加工方案

对于不淬硬的齿轮用滚齿或插齿即可满足加工要求；对于淬硬齿轮可采用滚（或插）—齿端加工—齿面热处理—修正内孔的加工方案。热处理前的齿形加工精度应比图样要求提高一级。

（2）6～7 级精度的齿轮

对于淬硬齿面的齿轮可以采用滚（插）齿—齿端加工—表面淬火—校正基准一磨齿的加工方案，这种方案加工精度稳定；也可以采用滚（插）—剃齿或冷挤—表面淬火—校正基准—内啮合珩齿的加工方案，此方案加工精度稳定，生产率高。

（3）5 级精度以上的齿轮

一般采用粗滚齿—精滚齿—表面淬火—校正基准—粗磨齿—精磨齿的加工方案。大批量生产时也可采用粗磨齿—精磨齿—表面淬火—校正基准—磨削外珩自动线的加工方案。这种加工方案的齿轮精度可稳定在 5 级以上，且齿面加工纹理十分错综复杂，噪声极低，是品质极高的齿轮。选择圆柱齿轮齿形加工方案可参考表 6-4。

表 6-4　圆柱齿轮齿形加工方法和加工精度

类型	不淬火齿轮										淬火齿轮											
精度等级	3	4	5		6			7			3～4	5			6			7				
表面粗糙度 R_a 值/μm	0.2～0.1	0.4～0.2			0.8～04			1.6～0.8			0.4～0.1	0.4～0.2			0.8～0.4			1.6～0.8				
滚齿或插齿	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
剃齿				●		●				●			●		●			●				
挤齿							●		●							●			●			
珩齿															●	●		●	●	●		
粗磨齿	●	●	●		●	●	●	●			●	●		●			●				●	
精磨齿	●	●	●	●							●	●	●	●								

6.3.2 成形法加工

成形法（仿形法）就是刀具的轴剖面刀刃形状和被切齿槽的形状相同。其刀具有盘状铣刀和指状铣刀等。用成形原理加工齿形的方法有用齿轮铣刀在铣床上铣齿、用成形砂轮磨齿、用齿轮拉刀拉齿等方法。

在万能铣床上用成形法铣制圆柱齿轮，铣制时，工件安装在铣床的分度头上，用一定模

数的盘状（或指状）铣刀对齿轮齿间进行铣削。加工完一个齿间后，进行分度，再铣下一个齿间，如图 6-3 所示。这种加工方法设备简单（用普通的铣床即可），刀具成本低。铣制同一模数不同齿数的齿轮所用的铣刀，一般只有 8 个刀号，每号铣刀有它规定的铣齿范围（见表 6-5）。这些方法由于存在分度误差及刀具的安装误差，所以加工精度较低，一般只能加工出 9～10 级精度的齿轮。此外，加工过程中需作多次不连续分齿，生产效率也很低。因此，主要用于单件小批量生产和修配工作中加工精度不高的齿轮。

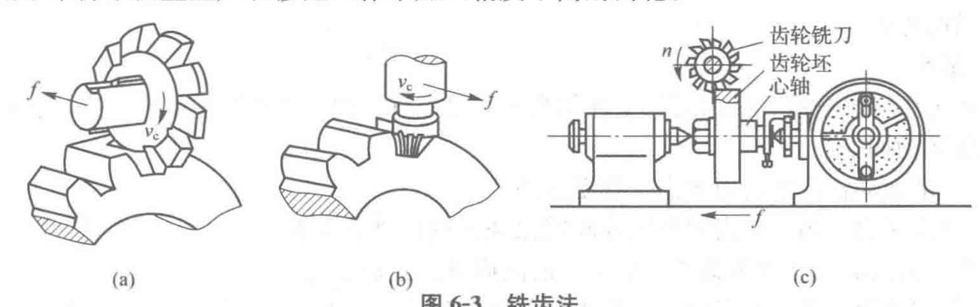


图 6-3　铣齿法

（a）盘形齿轮铣刀铣齿；（b）指状齿轮铣刀铣齿；（c）铣削时工件的安装

表 6-5　齿轮铣刀分号

铣刀号数	1	2	3	4	5	6	7	8
能铣制的齿数范围	12～13	14～16	17～20	21～55	26～34	35～54	55～134	135 以上

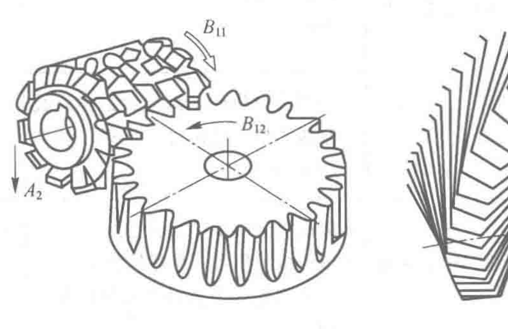
6.3.3　展成法加工

展成法（范成法）是应用齿轮啮合的原理来进行加工的，用这种方法加工出来的齿形轮廓是刀具切削刃运动轨迹的包络线。齿数不同的齿轮，只要模数和齿形角相同，都可以用同一把刀具来加工。用展成原理加工齿形的方法有滚齿、插齿、剃齿、珩齿和磨齿等方法。其中剃齿、珩齿和磨齿属于齿形的精加工方法。展成法的加工精度和生产效率都较高，刀具通用性好，所以在生产中的应用十分广泛。

1．滚齿

（1）滚齿加工原理和工艺特点

滚齿是应用一对螺旋圆柱齿轮的啮合原理进行加工的。所用刀具是齿轮滚刀。滚齿是齿形加工中生产率较高、应用最广的一种加工方法，其工作原理如图 6-4 所示。滚齿加工通用性好，既可加工圆柱齿轮，又可加工蜗轮；既可加工渐开线齿形又可加工圆弧、摆线等齿形；既可加工小模数、小直径齿轮，又可加工大模数、大直径齿轮。滚齿的加工精度等级一般为IT 6～IT9，对于 8，9



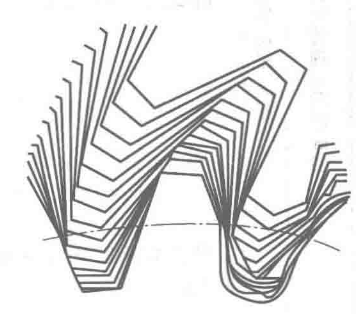


图 6-4　滚齿原理

级精度齿轮，可直接滚齿得到，对于 7 级精度以上的齿轮，通常滚齿可作为齿形的粗加工或半精加工。当采用 AA 级齿轮滚刀和高精度滚齿机时，可直接加工出 IT7 精度以上的齿轮。

（2）滚齿加工精度分析

在滚齿加工中，由于机床、刀具、夹具和齿坯在制造、安装和调整中不可避免地存在一些误差，因此被加工齿轮在尺寸、形状和位置等方面也会产生一些误差。这些误差将影响齿轮传动的准确性、平稳性、载荷分布的均匀性和齿侧间隙。滚齿误差产生的主要原因和采取的相应措施见表 6-6。

2. 插齿

从插齿原理上分析，插齿刀与工件相当于一对平行轴的圆柱直齿轮啮合，图 6-5 所示插齿的主要运动如下：

1）切削运动：即插齿刀的上下往复运动。

2）分齿展成运动：插齿刀与工件间应保证正确的啮合关系。插齿刀每往复一次，工件相对刀具在分度圆上转过的弧长为加工时的圆周进给运动。

3）径向进给运动：插齿时，为逐步切至全齿深，插齿刀应该有径向进给运动。

4）让刀运动：插齿刀作上下往复运动时，向下是工作行程。为了避免刀具擦伤已加工的齿面并减少刀齿的磨损，在插齿刀向上运动时，工作台带动工件退出切削区异端距离，插齿刀工作行程时，工件恢复原位。

插齿应用范围广泛，它能加工内外啮合齿轮、扇形齿轮齿条、斜齿轮等。但是加工齿条需要附加齿条夹具，并在插齿机上开洞；加工斜齿轮需要螺旋导轨。所以插齿适合于加工模数较小、齿宽较小、工作平稳性要求较高、运动精度要求不高的齿轮。

表 6-6 滚齿误差产生的主要原因和采取的相应措施

影响因素	滚齿误差		主要原因	采取的措施
影响传递运动准确性	齿距累积误差超差	齿圈径向圆跳动超差 F_r	•齿坯几何偏心或安装偏心造成	•提高齿坯基准面精度要求 •提高夹具定位面精度 •提高调整技术水平
			•用顶尖定位时，顶尖与机床中心偏心	•更换顶尖及提高中心孔制造 质量，并在加工过程中保护 中心孔
			•用顶尖定位使，因顶尖或中心孔制造不良，使定位面接触不好造成偏心	•提高顶尖及中心孔制造质量， 并在加工过程中保护中心孔
		公法线长度变动量超差 F_W	•滚齿机分度蜗轮精度过低 •滚齿机工作台圆形导轨磨损 •分度蜗轮与工作台圆形导轨不同轴	•提高机床分度蜗轮精度 •采用滚齿机校正机构 •修刮导轨，并以其为基准精 滚（或珩）分度蜗轮

续表

影响因素	滚齿误差		主要原因	采取的措施
影响传递运动的平稳、噪声、振动	齿形误差超差	齿形变肥或变瘦，且左右齿形对称	• 滚刀齿形角误差 • 前面刃磨产生较大的前角	• 更换滚刀或重磨前面
		一边齿顶变肥，另一边齿顶边瘦，齿形不对称	• 刃磨时产生导程误差或直槽滚刀 非轴向性误差 • 刀对中不好	• 误差较小时，重调刀架转角 • 重新调整滚刀刀齿，使它和 齿坯中心对中
		齿面上个别点凸出或凹进	• 滚刀容屑槽槽距误差	• 重磨滚刀前面
		齿形面误差近似正弦分布的短周期误差	• 刀杆径向圆跳动太大 • 滚刀和刀轴间隙大 • 滚刀分度圆柱对内 • 轴心线径向圆跳动误差	• 找正刀杆径向圆跳动 • 找正滚刀径向圆跳动 • 重磨滚刀前面
		齿形一侧齿顶多切，另一侧齿根多切切呈正弦分布	• 滚刀轴向齿距误差 • 滚刀端面与孔轴线不垂直 • 垫圈两端面不平行	• 防止刀杆轴向窜动 • 找正滚刀偏摆，转动滚刀或 刀杆加垫圈 • 重磨垫圈两端面
		基圆齿距偏差超差 f_{pb}	• 滚刀轴向齿距误差 • 滚刀齿形角误差 • 机床蜗杆副齿距误差过大	• 提高滚刀铲磨精度（齿距齿 形角） • 更换滚刀或重磨前面 • 检修滚齿机或更换蜗杆副
载荷分布均匀性	齿向误差超差		• 机床几何精度低或使用磨损（立 柱导轨、顶尖、工作台水平性等）	• 定期检修几何精度
			• 夹具制造、安装、调整精度低	• 提高夹具的制造和安装精度
			• 齿坯制造、安装、调整精度低	• 提高齿坯精度
	表面粗糙度差		• 滚刀因素 • 滚刀刃磨质量差 • 滚刀径向圆跳动量大 • 滚刀磨损 • 滚刀未固紧而产生振动 • 辅助轴承支承不好	• 选用合格滚刀或重新刃磨 • 重新校正滚刀 • 刃磨滚刀 • 紧固滚刀 • 调整间隙
			• 切削用量选择不当	• 合格选择切削用量
			• 切削挤压引起	• 增加切削液的流量或采用顺 铣加工
			• 齿坯刚性不好或没有夹紧，加工 时产生振动	• 选用小的切削用量，或夹紧 齿坯，提高齿坯刚性
			• 机床有间隙 • 工作台蜗杆副有间隙 • 滚刀轴向窜动和径向圆跳动大 • 刀架导轨与刀架间有间隙 • 进给丝杠有间隙	• 检修机床，消除间隙

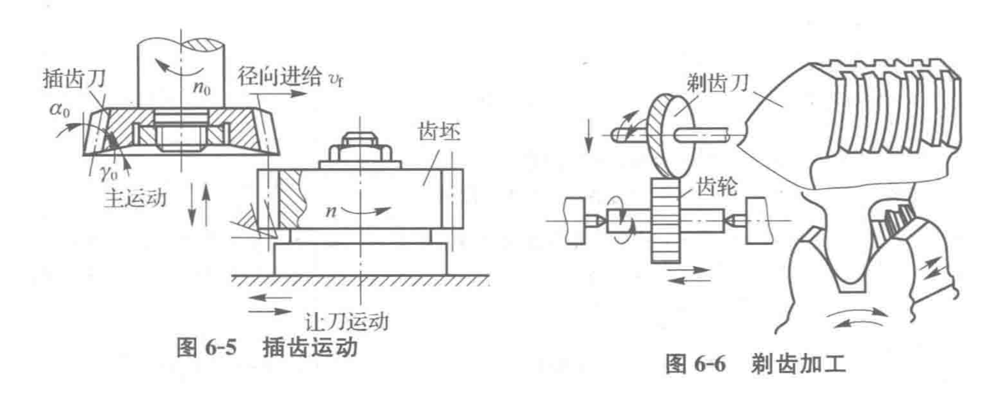


图 6-5　插齿运动

图 6-6　剃齿加工

3. 剃齿

剃齿是根据一对轴线交叉的斜齿轮啮合时，沿齿向有相对滑动而建立的一种加工方法，如图 6-6 所示。剃齿刀与工件间有一夹角 $\sum$ ，$\sum = \beta_g \pm \beta_d$ ，β_g ，β_d 分别为工件与刀具的分度圆螺旋角。工件与刀具螺旋方向相同时为＋，相反时为－。图 6-6 所示为一把右旋剃齿刀剃削一左旋齿轮的情况，$\sum = \beta_g - \beta_d$ ，剃齿时剃齿刀作高速回转并带动工件一起回转。在啮合点 P，剃齿刀圆周速度为 v_d，工件的圆周速度为 v_g，它们都可以分解为垂直螺旋线齿面的法向分量和螺旋面的切向分量。因为啮合点处的法向分量必须相等，而两个切向分量却不相等，因而产生相对滑动。由于剃齿刀齿面开有小槽，就产生了切削作用，相对滑动速度就成了切削速度。剃齿时剃齿刀和齿轮是无侧隙双面啮合，剃齿刀刀齿的两侧面都能进行切削。当工件旋向不同或剃齿刀正反转时，刀齿两侧切削刃的切削速度是不同的。为了使齿轮的两侧都能获得较好的剃削质量，剃齿刀在剃齿过程中应交替的进行正反转动。

剃齿是在滚齿之后，对未淬硬齿轮的齿形进行精加工的一种常用方法。由于剃齿的质量较好、生产率高、所用机床简单、调整方便、剃齿刀耐用度高，所以汽车、拖拉机和机床中的齿轮，多用这种加工方法来进行精加工。

目前我国剃齿加工中最常用的方法是平行剃齿法，它最主要的缺点是刀具利用率不高，局部磨损使刀具寿命降低；另一缺点是剃齿时间长，生产率低。为此，大力发展了对角剃齿、横向剃齿、径向剃齿等方法。

近年来，由于含钴、钼成分较高的高性能高速钢刀具的应用，使剃齿也能进行硬齿面的齿轮精加工。加工精度可达 IT 7 级，齿面的表面粗糙度值 R_a 为 0.8～1.6μm。但淬硬前的精度应提高一级，留硬剃余量为 0.01～0.03mm。

4. 珩齿

珩齿是热处理后的一种光整加工方法。珩齿的运动关系和所用机床与剃齿相似，珩轮与工件是一对斜齿轮副无侧隙的自由紧密啮合，所不同的是珩齿所用刀具是含有磨料、环氧树脂等原料混合后在铁心上浇铸而成的塑料齿轮。切削是在珩轮与被加工齿轮的“自由啮合”过程中，靠齿面间的压力和相对滑动来进行的。珩齿的运动与剃齿基本相同，即珩轮带动工件高速正反转；工件沿轴向往复运动及工件的径向进给运动。所不同的是其径向进给是在开车后一次进给到预定位置。因此，珩齿开始时齿面压力较大，随后逐渐减少，直至压力消失时珩齿便结束。

由于珩齿具有齿面的表面粗糙度值小、效率高、成本低、设备简单、操作方便等优点，故是一种很好的齿轮光整加工方法，一般可取加工IT6～IT8级精度的齿轮。

5. 挤齿（冷挤）

冷挤齿轮是一种齿轮无切削加工新工艺，有一些工厂已用它来代替剃齿，齿轮冷挤过程是挤轮与工件之间在一定压力下按无侧隙啮合的自由对滚过程，是按展成原理的无切削加工，挤轮实质上是一个高精度的圆柱齿轮，有的挤轮还有一定的变位量，挤轮与齿轮轴线平行旋转。挤轮宽度大于被挤齿轮宽度，所以在挤齿过程中只需要径向进给，无须轴向进给。挤轮的连续径向进给对工件施加压力，使工件齿廓表层金属产生塑性变形，以修正齿轮误差和提高表面质量。制造挤轮的材料要有一定的强度和耐磨性，可用铬锰钢或高速钢制造。为了防止工件与挤轮齿面的粘结，在冷挤过程中要加硫化油来润滑，这样既可使冷挤后齿面的表面粗糙度值减少，而且还可以提高挤轮的耐用度。

一般挤轮不开槽，结构简单，成本低，而且寿命却比剃齿刀长很多。一般挤轮可以加工上万个齿轮。

6. 磨齿

磨齿是齿形加工中精度最高的一种方法。对于淬硬的齿面，要纠正热处理变形，获得高精度齿廓，磨齿是目前最常用的精加工方法。 磨齿是用强制性的传动链，因此它的加工精度不直接决定于毛坯精度。磨齿可使齿轮精度最高达到 IT3 级，表面粗糙度 R_a 值可以达到 0.8～0.2μm，但加工成本高、生产率较低。

6.4 齿轮加工机床

齿轮加工机床是加工齿轮齿面的机床。齿轮加工机床按加工对象的不同，分为圆柱齿轮加工机床和锥齿轮加工机床两大类。圆柱齿轮加工机床主要有滚齿机、插齿机、车齿机等；锥齿轮加工机床有加工直齿锥齿轮的刨齿机、铣齿机、拉齿机和加工弧齿锥齿轮的铣齿机；下面主要介绍圆柱齿轮加工机床滚齿机、插齿机、磨齿机。

6.4.1 滚齿机

下面以 Y3150E 型滚齿机为例介绍滚齿机的结构，Y3150E 型滚齿机为中型滚齿机，能加工直齿、斜齿圆柱齿轮；用径向切入法能加工蜗轮，配备切向进给刀架后也可以用切向切入法加工蜗轮。滚齿机的主要参数为最大工件直径。

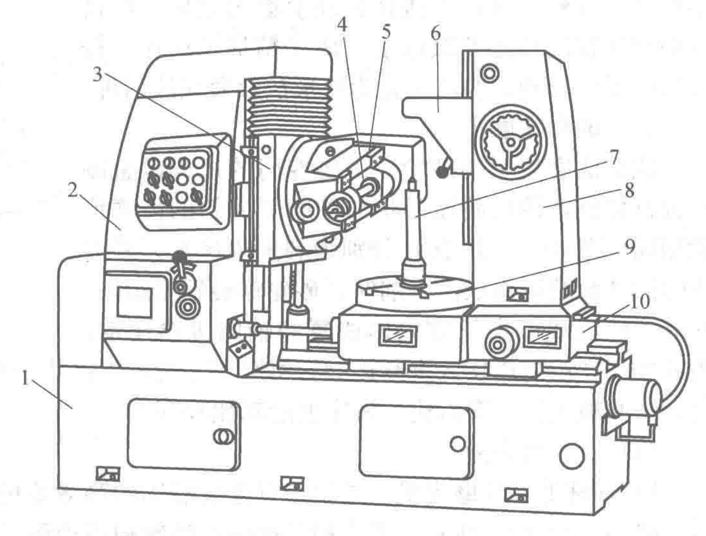


图 6-7 Y3150E 型滚齿机

1—床身；2—立柱；3—刀架溜板；4—刀杆；5—刀架体；6—支架；7—心轴；8—后立柱；9—工作台；10—床鞍

机床外形如图 6-7 所示。立柱 2 固定在床身 1 上，刀架溜板 3 可沿立柱上的导轨作轴向进给运动。安装滚齿的刀杆 4 固定在刀架体 5 中的刀具主轴上，刀架

体能绕自身轴线倾斜一个角度，这个角度称为滚刀安装角，其大小与滚刀的螺旋升角大小及旋向有关。安装工件用的心轴 7 固定在工作台 9 上，工作台与后立柱 8 装在床鞍 10 上，可沿床身导轨作径向进给运动或调整径向位置。支架 6 用于支承工件心轴上端，以提高心轴的刚性。

6.4.2 插齿机

插齿机也是一种常见的齿轮加工机床，主要用于加工直齿圆柱齿轮，增加特殊的附件后也可以加工斜齿圆柱齿轮。对滚齿机无法加工的内齿轮和多联齿轮，使用插齿机尤为适合。

插齿的原理相当于一对圆柱齿轮相互啮合，其中一个假想的齿轮是工件，另一个齿轮转化为磨有前角、后角而形成切削刃的刀具——插齿刀。用内联系传动链使插齿刀与工件之间按啮合规律作展成运动，同时插齿刀快速作轴向的切削主运动 A，就可以在工件上加工出齿形来，插齿机如图 6-8 所示。

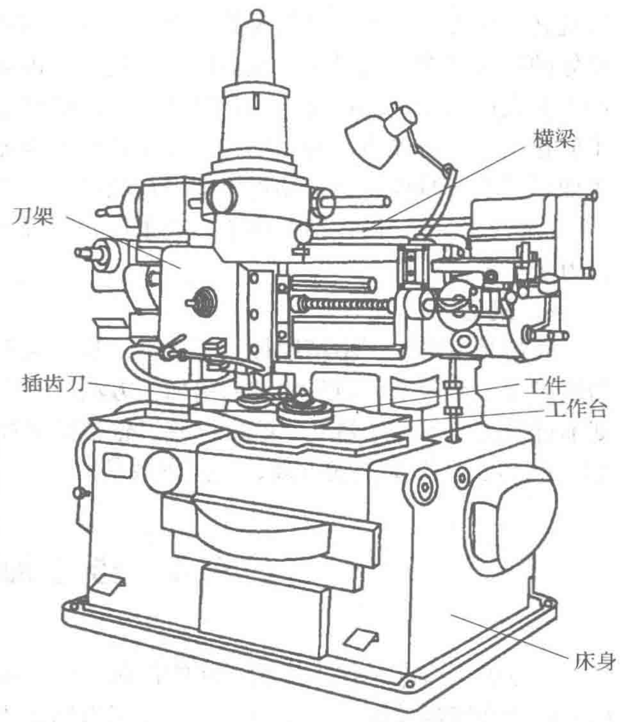


图 6-8 插齿机外形

6.4.3 磨齿机

磨齿机加工齿轮齿面的方式是用砂轮磨削，主要用于加工已经淬硬的齿轮，但对模数较小的某些齿轮，可以直接在齿坯上磨出齿轮。磨齿机的加工精度可达 6 级以上，属于精加工机床。按齿形的形成原理，磨齿也分为成形法及展成法两种。

(1) 成形法磨齿

成形法磨齿用的砂轮，需要专门的机构以金刚石进行修整，使其截面形状与被磨削齿轮的齿廓形状相同。图 6-9 (a) (b) 分别为磨削内齿轮、外齿轮时的砂轮截面形状。磨削时，砂轮作旋转主运动，并沿工件轴线即齿长方向作往复的轴向进给运动，还可在工件径向作切入进给运动。每磨一个齿，工件作一次分度运动，再磨削下一个齿。以成形法原理工作的磨齿机，机床的运动比较简单。

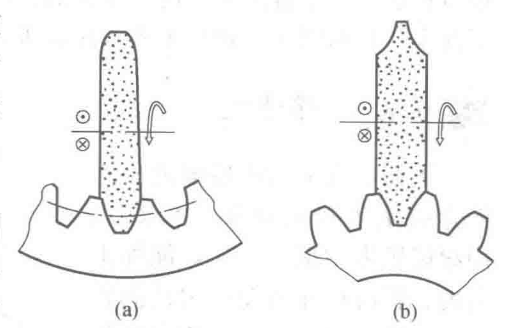


图 6-9 成形法磨齿

(2) 展成法磨齿

1) 蜗杆形砂轮磨齿机。这是一种连续磨削的高效率的磨齿机，其工作原理与滚齿机相同。如图 6-10 (a) 所示，大直径的蜗杆形砂轮相当于滚刀，加工时砂轮与工件作展成运动，轴向进给运动一般由工件完成。这种机床的生产效率高，但蜗杆形砂轮高速转动时，机械式

内联系传动链的零件转速很高，噪声大且易磨损，同时砂轮修复困难，难以获得高的加工精度。这种机床一般用于成批或大量生产中磨削中、小模数的齿轮。

2）锥形砂轮磨齿机。这种机床属于单齿分度型，每次磨削一个齿，其磨齿原理相当于齿轮与齿条相啮合。如图6-10（b）所示，砂轮的两个侧面修整成锥面，其截面形状与齿条相同。砂轮作高速旋转的主运动，并沿工件齿长方向作往复的进给运动，两侧面的母线就形成了假想齿条的一个齿。再强制工件在此不动的假想齿条上一边啮合一边滚动，即工件齿轮转动一个齿（$1/z$ 转）的同时，工件轴线移动一个齿距 πm。实际使用的砂轮比齿条的一个齿略窄一些，往一个方向滚动时只磨削齿槽的一侧，每往复滚动一次磨出齿槽的两个侧面，工件经多次分度后就可磨削完毕。由此可见，形成工件的母线（渐开线）是用展成法，由工件同时作转动 B_{31} 和横向移动 B_{32} 来实现的；而工件上的导线（直线），是用相切法，由砂轮旋转主运动 B_1 和纵向移动 A_2 来实现的。

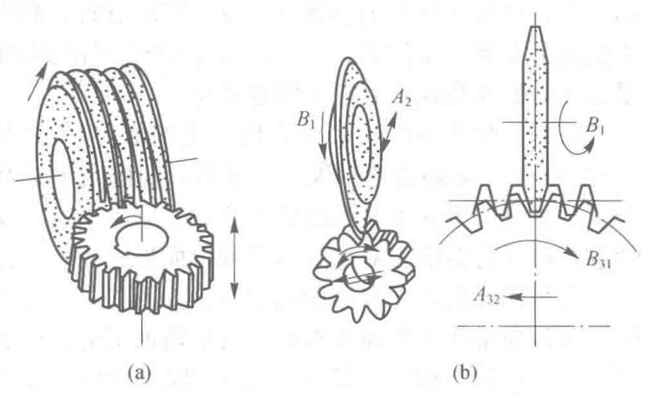


图6-10　展成法磨齿的工作原理

6.5　齿轮加工刀具

齿轮刀具按其工作原理，可分为成形法齿轮刀具和展成法齿轮刀具两大类。常用的成形法齿轮刀具有盘形齿轮铣刀、指状齿轮铣刀等。这类铣刀结构简单，加工精度和效率较低，主要用于单件小批生产和修配。展成法齿轮刀具齿形不同于被加工齿轮的齿槽形状，同一把刀具可以加工模数、压力角相同而齿数不同的齿轮。常用的展成齿轮刀具有齿轮滚刀、插齿刀、剃齿刀等。

6.5.1　滚齿刀

滚齿刀是按照展成法的原理来加工齿轮的刀具，用滚刀来加工齿轮相当于一对交错轴斜齿轮啮合。在这对啮合的齿轮传动中，一个齿轮的齿数很少，只有一个或几个，螺旋角很大，这就演变成了一个蜗杆，再将蜗杆开槽并铲背，就成为齿轮滚刀。在齿轮滚刀螺旋线法向剖面内各刀齿成了一根齿条，当滚刀连续转动时，相当于一根无限长的齿条沿刀具轴向连续移动。因此在滚齿过程中，在滚刀按给定的切削速度作旋转运动时，齿坯则按齿轮啮合关系转动（即当滚刀转一圈，相当于齿条移动一个或几个齿距，齿坯也相应转过一个或几个齿距），在齿坯上切出齿槽，形成渐开线齿面，如图6-4（a）所示。渐开线齿廓则由切削刃一系列瞬时位置包络而成，如图6-4（b）所示。滚刀的法向模数和齿形角必须与被加工齿轮的法向模数和齿形角相等。滚齿时除了滚刀的旋转运动（主运动）、滚刀与齿坯之间的展成运动（也就是连续分齿运动）外，滚刀还需有沿工件轴向（齿宽方向）的进给运动，这三个

运动构成了滚齿的基本运动，如图 6-4（a）所示。

滚刀的精度等级为 AA 级，A 级，B 级和 C 级，AA 级精度最高。滚齿时使用不同精度的滚刀，可分别加工出精度为 IT7，IT8，IT9，IT10 的齿轮。滚齿时，为了提高齿面的加工精度和质量，应将粗、精滚齿加工分开。精滚齿的加工余量为 0.5～1 mm，精滚齿时应采取较高的切削速度和较小的进给量。

目前，生产中广泛采用的是高速钢滚刀，切削速度一般为 30 m/min 左右，进给量为 1～3 mm/r。超硬高速钢滚刀出现后，切削速度提高了 60～70 m/min；滚刀刀齿采用硬质合金后，其切削速度又提高到了 80～200 m/min，使滚齿加工的生产率得到了大幅度提高。此外，硬质合金滚刀对淬火后的硬齿面齿轮还可进行精加工或半精加工。

滚齿既可以用于齿形的粗加工，也可以用于精加工。加工精度等级为 IT7 以上的齿轮时，滚齿通常作为剃齿或磨齿等齿形精加工前的粗加工和半精加工工序。滚齿加工所使用的滚刀和滚齿机结构比较简单，易于制造，加工时是连续切削的，具有质量好、效率高的优点，因此，在生产中广泛应用。

6.5.2 插齿刀

插齿加工是应用较多的一种方法。插齿刀就像一个磨有前后角而形成刀刃的齿轮，如图 6-5 所示。

插齿加工时插齿刀和工件之间的运动如下：

1）切削运动。插齿刀上下往复运动实现切削运动。

2）分齿运动。插齿刀和工件之间需保持一对圆柱齿轮的啮合关系，由插齿机的传动链提供强制性啮合运动，并满足 $i=\frac{n_{刀}}{n_{工}}=\frac{z_{工}}{z_{刀}}$ 的关系。式中：$n_{刀}$，$n_{工}$ 分别为插齿刀与工件的转速；$z_{刀}$，$z_{工}$ 分别为插齿刀与工件的齿数。

3）径向进给运动。插齿时靠插齿机凸轮等机构实现径向进给，当切至全齿深时，径向进给自动停止，然后在无进给下切出整圈轮齿。

4）圆周进给运动。插齿刀每一往复行程在分度圆上所转过的弧长，称圆周进给量。因此，插齿啮合过程也是圆周进给过程。

5）让刀运动。如图 6-5 所示，插齿刀向下进行切削，向上是空行程。为了避免擦伤齿面和减少刀具磨损，空行程时，工作台需作让刀运动，使刀具离开工件。向下切削时，工作台回复到原位。

6.5.3 剃齿刀

剃齿是齿轮精加工方法之一，剃齿是利用一对两交叉轴的螺旋齿轮啮合的原理，在剃齿机上进行的一种精加工齿轮方法。盘形剃齿刀相当于一个高精度的螺旋齿轮，在每个轮齿的齿侧沿渐开线方向开有许多小槽以形成切削刃（见图 6-11（a），所以用圆盘剃齿刀剃齿也相当于一对螺旋齿的啮合原理。

加工时将滚齿或插齿后的工件装在顶尖间，使之能自由转动，剃齿刀装在机床主轴上带动工件转动，剃齿刀与工件的齿向一致，两者形无侧隙、双面紧密啮合的自由对滚而完成切削过程。由于剃齿刀与工件，两者相当于一对螺旋齿轮，所以在接触点的切向分速度不一

致，这样工件的齿侧面沿剃齿刀的齿侧面就产生滑移，利用这个相对滑移速度来进行切削，这就是剃齿。

剃齿时切削速度分析如图 6-11（b）所示，剃齿刀与工件轴线夹角 $\phi=\beta_{工}\pm\beta_{刀}$（$\beta_{工}$ 和 $\beta_{刀}$ 为工件与剃齿刀的螺旋角，两者螺旋同向时取“+”号，反向时取“−”号）。图 6-11（b）表示左旋剃齿刀和右旋被加工齿轮啮合，在啮合点 P，剃齿刀与工件的圆周速度为 $v_{刀}$ 和 $v_{工}$，可以分解为法向分速度 $v_{刀法}$ 和 $v_{工法}$，切向分速度 $v_{刀切}$ 和 $v_{工切}$。剃齿刀和工件在啮合点的法向分速度应相等（即 $v_{刀法}=v_{工法}$），而两者切向分速度不相等，就产生了齿面的相对滑移。剃齿刀和工件在啮合点 P 的齿面滑移速度 v_P 为两者切向分速度的差值 $v_P=v_{刀切}\pm v_{工切}$（两者螺旋同向时取“+”号，反向时取“−”号）。ϕ 值越大，则 v_P 越大，但刀具与工件接触情况不良，一般取 $\phi=10°\sim15°$。

由于剃齿刀与工件啮合时为点接触，为了剃出轮齿的全齿宽，工作台必须作纵向往复运动（$S_{纵}$），工件每转的轴向进给量为 0.15～0.3mm，工作台每次行程后，剃齿刀、带动工件反转，以剃出另一齿侧面。工作台每次双行程后，工件作径向进给（$S_{径}$）0.025～0.04mm，剃齿刀在进刀压力作用下，就能切入金属层，这样逐步剃去滚（或插）齿所留的全部余量，最后得到所需的齿厚。

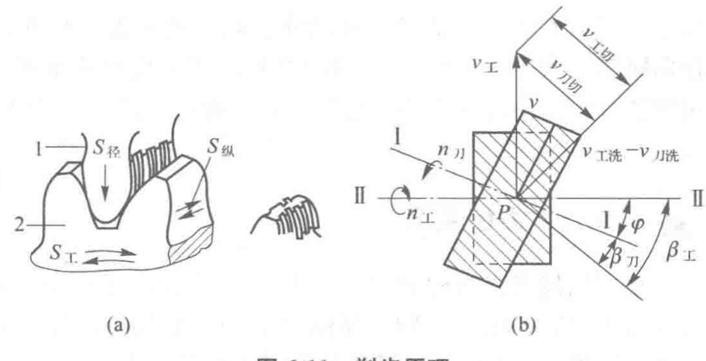


图 6-11 剃齿原理

（a）剃齿刀；（b）剃齿速度

由上述可知，剃齿时具有以下三个基本运动：

1）剃齿刀的高速正、反转（$n_{刀}$,）；

2）工件沿轴向往复运动（$S_{纵}$）：

3）工件每一往复行程后，剃齿刀的径向进给运动（$S_{径}$）。

6.6 齿轮的装夹

齿轮按齿坯形状分为轴类和盘类。加工轴类时一般采用双顶尖孔定位。盘类齿轮的定位基准应与设计基准及与轴连接的装配基准（圆孔和花键孔等）相一致。盘类齿轮的端面作为辅助辅助定位基准。因此在齿坯加工时，端面对内孔的圆跳动不得大于 0.04mm。

6.6.1 滚齿夹具

滚齿夹具一般采用组合结构，即由夹具底座和心轴组成，同一规格的夹具，底座能安装不同规格的心轴，具有成本低调整方便的优点。最常用的滚齿夹具如图 6-12 所示。底座根据工件的大小可分成 2～3 种，按工件的分度圆选用。两端面对中心线的端面跳动不能大于 0.005mm。心轴的圆柱面为工作表面，其直径为工件最小孔径减去公差 0.005～0.01mm。

心轴的径向跳动不大于 0.005mm。定位端面与心轴的垂直度不大于 0.005mm。为保持夹具精度及使用寿命，心轴必须经过淬硬处理和磨削。各压圈、垫片的两端面要平行，平行度不大于 0.005mm。为使工件夹紧时受力均匀，压紧用的垫圈一般采用球面垫圈。

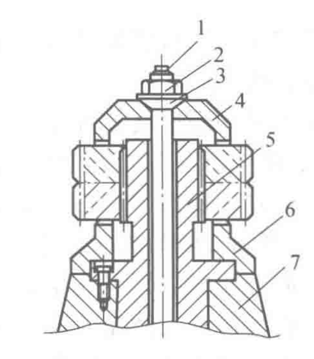


图 6-12 渐开线花键齿轮滚齿夹具

1—螺杆；2—螺母；3—球面垫圈；4—压圈；5—心轴；6—垫圈；7—底座

6.6.2 剃齿夹具

剃齿夹具一般采用心轴形式，如图 6-13 所示。因剃齿余量小，故切削力也小。压套与工件接触的端面要求平整，端面跳动不大于 0.005mm。端面及内孔表面粗糙度不大于 $R_a0.4$um。心轴工作尺寸选取与滚齿夹具相同，径向跳动不大于 0.005mm。端面及外圆的表面粗糙度不大于 $R_a0.4$um。压套与心轴都要经过淬硬处理，中心孔需要经过研磨，表面粗糙度不大于 $R_a0.2$um，其 60°锥面处接触面积应大于 80%。

6.6.3 插齿夹具

常用插齿夹具结构如图 6-14 所示。工作尺寸小于 40mm 时，心轴采用整体结构。工作尺寸大于 40mm 时，心轴采用镶套结构。心轴工作尺寸的选取与滚齿夹具相同。与工作台连接处锥度为 1∶10。外径及锥面径向跳动不大于 0.005mm。表面粗糙度不大于 $R_a0.4\mu$m。心轴必须经过淬硬处理和磨削，螺纹部位不淬硬。垫圈两平面要平整，两端面平行度误差不大于 $R_a0.005$mm。

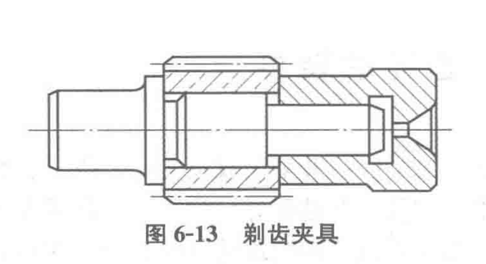


图 6-13 剃齿夹具

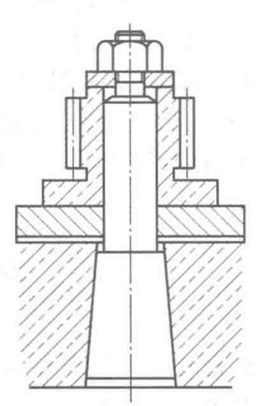


图 6-14 插齿夹具

6.7　齿轮类零件的检验

6.7.1　齿轮零件的检验项目

齿轮检验按其目的可分为验收检验和工艺检验。验收检验时可选用与齿轮使用条件相近的齿轮单面啮合综合检验，或选用表 6-5 所示的公差组中的公差，根据需要组合进行检验，以便按齿轮精度要求全面地评定齿轮加工质量，确定其是否合格。工艺检验时可采用齿形误差、基节偏差、公法线长度变动和齿圈径向跳动等单项检验项目，以分析该工序的加工误差，评定机床-刀具-工件系统的精度。齿轮侧隙用齿厚偏差与公法线平均长度偏差等指标来评定。

渐开线圆柱齿轮（GB/T 10095）检验要求如下：

1）必检项目。单个齿距极限偏差、齿距累积总公差、齿廓总公差、螺旋线总公差、径向综合偏差、径向跳动。

2）非必检项目。切向综合偏差、齿廓形状偏差、齿廓倾斜偏差、螺旋线形状偏差、螺旋线倾斜偏差。

3）除另有规定外，均在接近齿高中部的位置测量。

4）当测量切向综合偏差时，产品齿轮在适当的中心距下（有一定的侧隙）与测量齿轮单面啮合，同时要加上一轻微而足够的载荷。

表 6-5　齿轮公差组与检验组合

公差组	公差与极限偏差	误差特性	对传动性能的主要影响
Ⅰ	$\Delta F_i'$，ΔF_p，ΔF_{PK}，$\Delta F_i''$，ΔF_r，ΔF_W	以齿轮一转为周期的误差	传递运动的正确性
Ⅱ	$\Delta f_i'$，Δf_{fa}，Δf_{pt}，Δf_{pb}，$\Delta f_i'$，$\Delta f_{f\beta}$	在齿轮一转内多次地重复出现的误差	传动的平稳性、噪声、振动
Ⅲ	ΔF_β	齿向线的误差	载荷分布的均匀性

注：$\Delta F_i'$—切向综合误差；ΔF_p—齿距累积误差；$\Delta F_i''$—径向综合误差；ΔF_r—径向跳动公差；ΔF_W—公法线长度变动；Δf_W—公法线长度变动；Δf_{ft}—单个齿距累积偏差；$\Delta f_i'$—齿切向综合误差；Δf_{fa}—齿廓形状公差；$\Delta f_{f\beta}$—螺旋线形状公差；Δf_{pb}—基圆偏差；$\Delta f_i''$—齿径向综合误差；ΔF_β—螺旋线总公差；ΔF_{PK}—K 个齿距偏差。

6.7.2　圆柱齿轮的检验方法

1. 齿轮公法线长度变动 ΔF_W

齿轮公法线长度变动是指实际公法线长度的最大值与最小值之差，即 $\Delta F_W = W_{max} - W_{min}$，它是评定齿轮运动准确性的指标之一。

齿轮公法线平均长度偏差 ΔE_{wm} 是指齿轮在一周范围内，齿轮公法线实际长度的平均值与公称值之差，即 $\Delta E_{wm} = W_{平均} - W_{公称}$，它是用来控制齿轮啮合时的齿侧间隙。

公法线长度可用公法线千分尺、公法线指示卡规或万能测齿仪等计量器具测量，公法线千分尺是在普通外径千分尺测头上安装两个大平面测头，其读数方法与普通千分尺相同，如图 6-15 所示。

2. 齿圈径向跳动误差 ΔF_r

齿圈径向跳动误差是指在齿轮一转范围内，测头在齿槽内或在轮齿上，于齿高中部双面

接触，测头相对齿轮轴线的最大变动量，即最大值和最小值之差，如图 6-16 所示。它可以用齿圈径向跳动检查仪，也可用万能测齿仪等具有顶针架的仪器测量。

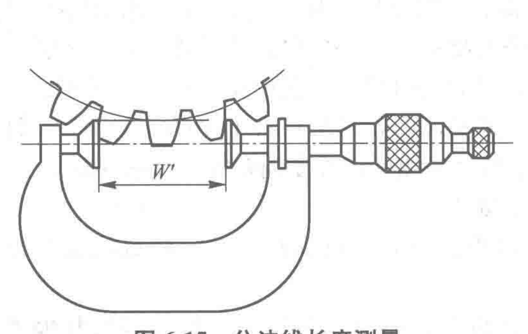


图 6-15　公法线长度测量

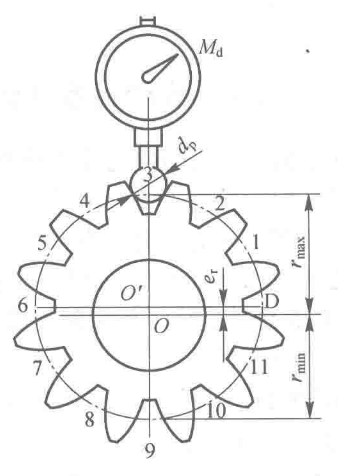


图 6-16　齿圈径向跳动测量

图 6-17 所示为齿圈径向跳动检查仪外形图。芯轴 11 装入被测齿轮后，安装在左右顶针 5 之间，两顶针架在滑板 1 上。转动手轮 2 可使滑板 1 及其上之承载物一起左右移动。在底座后方螺旋立柱 6 上有一表架，百分表 10 装在表架前弹性夹头中。拨动抬升器 9 可使百分表测量头 13 放入齿槽或退出齿槽。齿圈径向跳动检查仪还附有不同直径的测量头，用于测量各种模数的齿轮。附有各种杠杆，用于测量锥齿轮和内齿轮的齿圈跳动。

3. 齿厚偏差 ΔE_s

齿厚偏差 ΔE_s 是指实际齿厚和公称齿厚之差。它是控制齿轮副隙侧的基本指标之一。图 6-18 所示为测量齿厚的游标卡尺。它由两套相互垂直的游标卡尺组成，垂直游标尺用于控制被测齿轮的弦齿高，水平游标尺则用于测量实际弦齿厚。

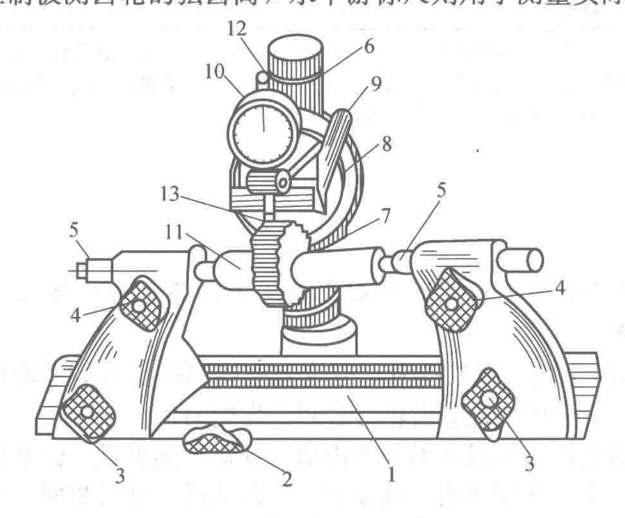


图 6-17　齿圈径向跳动检查仪

1—支撑滑板；2—手轮；3、4—紧固螺钉；5—顶尖；6—立柱；7—调节螺母；8—指示表摇臂支架；9—抬升器；10—指示表；11—被测齿轮；12—调节螺钉；13—测量头

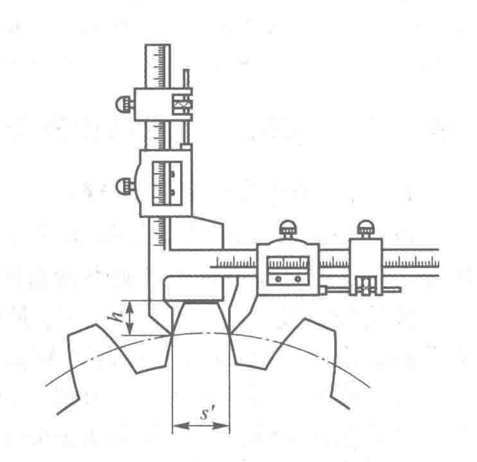


图 6-18　齿厚卡尺测量弦齿厚

1—量爪端面；2—齿高尺；3—主尺；4—齿厚尺主标记；5—量爪端面；6—齿厚尺框；7—微动装置

测量时，垂直游标以齿顶圆为基准，而分度圆的实际弦齿高为

$$h=\bar{h}_a+\frac{\Delta E_d}{2}$$

式中 ΔE_d——实际齿顶圆直径与齿顶圆公称直径的差值；

$\bar{h}_a$——标准弦齿高。

4. 齿距累积误差 ΔF_p

齿距累积误差 ΔF_p 是在分度圆上任意两个同侧齿廓之间的实际弧长与公称弧长之差的最大绝对值。齿距偏差是在分度圆上实际齿距（分度圆上相邻两齿同侧齿廓的弧长）与公称齿距（可取齿轮上所有实际齿距的平均值）之差。

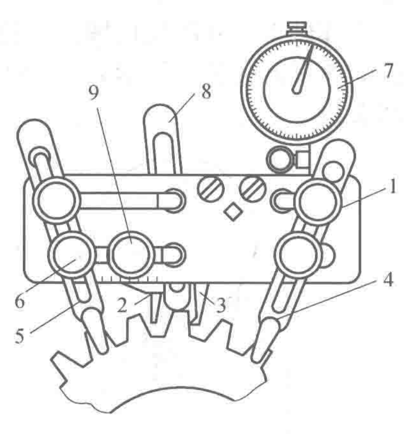


图 6-19 周节仪

1—基体；2—活动测头；3—固定测头；4、5—定位头；6—锁紧螺钉；7—指示表；8—定位头；9—锁紧螺钉

齿距累积误差和齿距偏差往往采用相对测量法测量，它是以某一实际齿距为基准，测量同一圆上其余各齿距对基准齿距之差，此差值称为齿距相对偏差。然后将各个齿距相对偏差取代数和，除以齿轮齿数得平均值，再将各齿距相对偏差减去平均值，得到各齿距偏差。

如图 6-19 所示，用周节仪测量齿距，定位头 4，5，8 以齿顶圆作为定位基准。测量前，调整好定位头的相对位置，使测头 2，3 在分度圆附近与齿面接触。按被测齿轮模数调整固定测头 2 的位置，将活动测头 3 与指示表 7 相连，测量齿距时，齿距误差通过测头 3 的杠杆传给指示表 7。

5. 径向综合误差 $\Delta F_i''$

径向综合误差 $\Delta F_i''$ 是指被测齿轮和理想精确齿轮（标准齿轮）双面啮合时，在被测齿轮一转内，双面啮合中心距的最大值和最小值之差。一齿径向综合误差 $\Delta f_i''$ 是指被测齿轮与标准齿轮双向啮合时，被测齿轮一齿距角内，双啮中心距的最大变动量。图 6-20 所示为双面啮合检查仪的外形图，它能测量圆柱齿轮、圆锥齿轮和蜗轮副。仪器的底座 1 上安放着浮动滑板 2 和固定滑板 3。浮动滑板 2 受压缩弹簧的作用，使两齿轮紧密啮合，其位置由凸轮 10 控制，固定滑板 3 与标尺 4 连接，可用手轮 6 调整位置。仪器的读数与记录装置由指示表 11、记录器 12、记录笔 13、记录滚轮 14 和摩擦盘 15 组成。

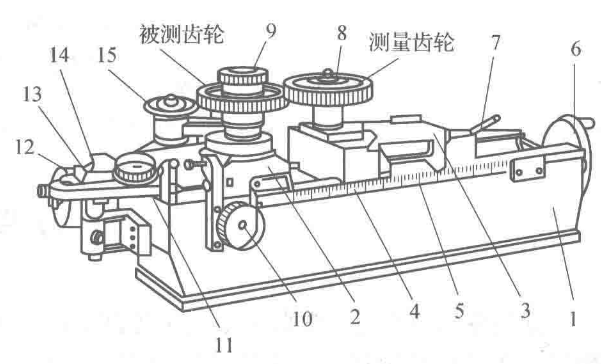


图 6-20 双面啮合检查仪

1—底座；2—浮动滑板；3—固定滑板；4—标尺；5—底座；6—手轮；7—锁紧扳手；8、9—芯轴；10—凸轮；11—指示表；12—记录器；13—记录笔；14—记录滚轮；15—摩擦盘

测量时，径向误差直接由指示表 11 读出。被测齿轮安装在浮动滑板 2 的芯轴 9 上，标准（理想精确）齿轮安装在固定滑板 3 的芯轴 8 上。由于被测齿轮存在各种误差（如基节偏差、周节偏差、齿圈径向跳动误差和齿形误差等），当两个齿轮啮合转动时，这些误差通过浮动滑板上的一套装置反映在指示表上。

6. 基节偏差 Δf_{pb}

基节偏差 Δf_{pb} 是实际基节与公称基节之差。测量基节偏差的原理如图 6-21（a）所示，测头 1 和 2 的工作面均面向被测齿廓，与相邻两齿面接触时两测头之间的距离为实际基节，公称基节由标准量块来校准。指示表 4 上的读数和公称基节读数的差值为基节偏差。图 6-21（b）所示为公称基节调零用量块夹。在图 6-21（a）中，测头 1 和定位头 3 在一个部件上，其跨度用螺杆 8 调节。旋转螺杆 7 可使此部件沿仪器本体 5 平移，测头 2 的摆动通过杠杆传给指示表 4。测头 1 和 2 的间距利用量块夹中量块组 10 校准以达到公称基节值。

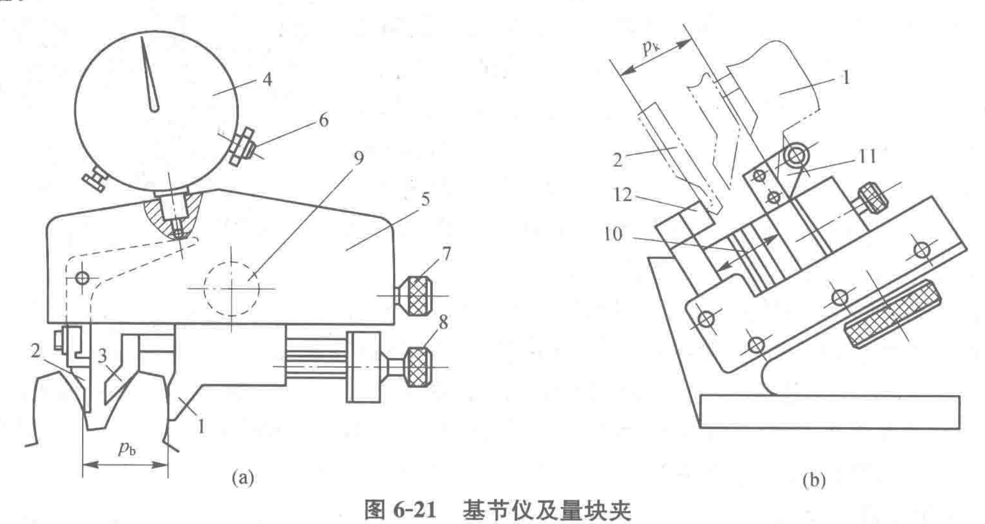


图 6-21　基节仪及量块夹

（a）基节仪；（b）量块夹

1—固定测头；2—活动测头；3—定位头；4—指示表；5—壳体；6—微动小轮；7、8—螺杆；9—夹紧螺钉；10—量块组；11、12—量块夹上测头

6.8　项目实施

通过学习项目 2，掌握了工艺规程制定的基本知识，包括零件的结构工艺性分析、毛坯确定、工艺路线拟订、工序设计等内容。通过学习 6.2～6.7 节，了解了齿轮类零件的功用及结构特点、技术要求以及一般齿轮类零件的材料、毛坯及热处理等相关知识，掌握了齿轮类零件的加工方法、常用加工设备、常用加工刀具、齿轮类零件的检验、简单齿轮类零件的加工工艺分析等要点。下面将回到 6.1 节中介绍的工作任务，根据前面学习的内容按要求完成工作任务。

1. 任务分析

6.1 中任务的完成需要学生掌握相关专业基础知识，包括机械制图、公差与配合、机械设计基础、金属工艺学等；需要学生掌握项目 2 机械加工工艺规程设计，项目 5 箱体类零件加工方法、加工设备、加工刀具等知识点，并且需要学生已经经历了利用手动工具加工零件、利用普通机床加工零件等金工实践环节。在此基础上还需要掌握以下知识：

1）齿轮类零件的加工方法。

2）齿轮类零件常用的加工设备。

3）齿轮类零件常用的加工刀具。

4）齿轮类零件的检验。

5）典型齿轮类零件的加工工艺分析。

2. 工作计划

在项目实训过程中，结合创设情景、观察分析、现场参观、讨论比较、案例对照和评估总结等活动，充分调动学生学习的主动性和积极性，让学生自主地学习、主动地学习。各小组协同制订实施计划及执行情况见表6-6，共同解决实施过程中遇到的困难；要相互监督计划执行与完成的情况，保证项目完成的合理性和正确性。

表6-6　齿轮零件加工工艺编制计划及执行情况表

序号	内　容	要　求	教学组织与方法
1	研讨任务	根据给定的零件图样、任务要求，分析任务完成需要掌握的相关知识	分组讨论，采用任务引导法教学
2	计划与决策	企业参观实习、项目实施准备、制订项目实施详细计划、学习与项目相关的基础知识	分组讨论、集中授课，采用案例法和示范法教学
3	实施与检查	根据计划，分组讨论并审查齿轮零件图样的工艺性；分组讨论并确定齿轮毛坯类型、机械加工顺序；选择2～3个重要工序，分析讨论并确定工序内容	分组讨论、教师点评
4	项目评价与讨论	（1）评价齿轮零件加工工艺分析的充分性、正确性 （2）评价零件毛坯选择的正确性 （3）评价零件加工顺序制订的合理性与可行性 （4）评价重要工序内容确定的正确性与合理性 （5）评价学生的职业道德和团队协作精神	项目评价法实施评价

3. 实施过程

（1）定位基准的选择

为保证齿轮的加工质量，齿形加工时应根据“基准重合”原则，选择齿轮的装配基准和测量基准为定位基准，而且尽可能在整个加工过程中保持基准的统一。

对于齿轮加工基准的选择常因齿轮的结构形状不同而有所差异。带轴齿轮主要采用中心孔定位；对于空心轴，则在中心内孔钻出后，用两端孔口的斜面定位；孔径大时则采用锥堵。顶点定位的精度高，且能作到基准重合和统一。对带孔齿轮在齿面加工时常采用以下两种定位、夹紧方式。

1）以内孔和端面定位。这种定位方式是以工件内孔定位，确定定位位置，再以端面作为轴向定位基准，并对着端面夹紧。这样可使定位基准、设计基准、装配基准和测量基准重合，定位精度高，适合于批量生产。但对于夹具的制造精度要求较高。

2）以外圆和端面定位。当工件和夹具心轴的配合间隙较大时，采用千分表校正外圆以确定中心的位置，并以端面进行轴向定位，从另一端面夹紧。这种定位方式因每个工件都要校正，故生产率低；同时对齿坯的内、外圆同轴要求高，而对夹具精度要求不高，故适用于单件、小批生产。

齿轮淬火后其孔常发生变形，孔直径可缩小 0.01～0.05 mm。为确保齿形精加工质量，必须对基准孔予以修整。修整一般采用磨孔或推孔。对于成批或大批大量生产的未淬硬的外径定心的花键孔及圆柱孔齿轮，常采用推孔。推孔生产率高，并可用加长推刀前导引部分来保证推孔的精度。对于以小径定心的花键孔或已淬硬的齿轮，以磨孔为好，可稳定地保证精度。磨孔应以齿面定位，符合互为基准原则。

(2) 齿坯加工

齿形加工前的齿轮加工称为齿坯加工，在整个齿轮加工过程中占有很重要的地位。齿坯的外圆、端面或孔经常作为齿形加工、测量和装配的基准，所以齿坯的精度对于整个齿轮的精度有着重要的影响。另外，齿坯加工在齿轮加工总工时中占有较大的比例，因而齿坯加工在整个齿轮加工中占有重要的地位。

1) 齿坯精度。齿轮在加工、检验和装夹时的径向基准面和轴向基准面应尽量一致。多数情况下，常以齿轮孔和端面为齿形加工的基准面，所以齿坯精度中主要是对齿轮孔的尺寸精度和形状精度、孔和端面的位置精度有较高的要求；当外圆作为测量基准或定位、找正基准时，对齿坯外圆也有较高的要求。具体要求见表 6-7 和表 6-8。

表 6-7　齿坯尺寸和形状公差

齿轮精度等级	5	6	7	8
孔的尺寸和形状公差	IT5	IT6	IT7	
轴的尺寸和形状公差	IT5	IT6		
外圆直径尺寸和形状公差	IT7	IT8		

注：1. 当齿轮的三个公差组的精度等级不同时，按最高等级确定公差值。

2. 当不以外圆作测齿厚的基准面时，尺寸公差 IT11 给定，但不大于 0.1mm。

3. 当以外圆作基准面时，本表就指外圆的径向圆跳动。

表 6-8　齿坯基准面径向和端面的圆跳动公差

齿轮精度等级 / 公差/μm / 公度圆直径/mm	5 和 6	7 和 8
～125	11	18
125～400	14	22
400～800	20	32

2) 齿坯加工方案的选择。齿坯加工的主要内容包括齿坯的孔加工、端面和中心孔的加工（对于轴类齿轮）以及齿圈外圆和端面的加工；轴类齿轮、套筒齿轮和套筒齿轮的齿坯，其加工过程和一般轴、套类基本相同，下面主要讨论盘类齿轮齿坯的加工工艺方案。齿坯的加工工艺方案主要取决于齿轮的轮体结构和生产类型。

a. 大批大量生产的齿坯加工。大批大量加工中等尺寸齿轮齿坯时，多采用“钻—拉—多刀车”的工艺方案：

• 以毛坯外圆及端面定位进行钻孔或扩孔。

• 拉孔。

• 以孔定位在多刀半自动车床上粗、精车外圆、端面、车槽及倒角等。

由于这种工艺方案采用高效机床组成流水线或自动线，所以生产率高。

b. 成批生产的齿坯加工成批生产齿坯时，常采用“车—拉—车”的工艺方案：

• 以齿坯外圆或轮毂定位，粗车外圆、端面和内孔。

• 以端面支承拉孔（或花键孔）。

• 以孔定位精车外圆及端面等。

这种方案可由卧式车床或转塔车床及拉床实现。其特点是加工质量稳定，生产效率较高。

当齿坯孔有台阶或端面有槽时，可以充分利用转塔车床上的转塔刀架来进行多工位加工，在转塔车床上一次完成齿坯的全部加工。

c. 单件小批生产的齿坯加工。单件小批生产齿轮时，一般齿坯的孔、端面及外圆的粗、精加工都在通用车床上经两次装夹完成，但必须注意将孔和基准端面的精加工在一次装夹内完成，以保证位置精度。

（3）齿形加工

齿圈上的齿形加工是整个齿轮加工的核心。尽管齿轮加工有许多工序，但都是为齿形加工服务的，其目的是最终获得符合精度要求的齿轮。齿形加工方案的选择，主要取决于齿轮的精度等级、结构形状、生产类型和齿轮的热处理方法及生产现场的条件。对于不同精度的齿轮，常用的齿形加工方案如下：

1）8 级精度以下齿轮。调质齿轮用滚齿或插齿应能满足要求。对于淬硬齿轮可采用滚（插）齿—齿端加工—淬火—校正孔的加工方案，但在淬火前齿形加工精度应提高一级。

2）6～7 级精度齿轮。对于淬硬齿面的齿轮可采用滚（插）齿—齿端加工—剃齿—表面淬火—校正基准—珩齿的加工方案。这种方案生产效率高，设备简单，成本较低，适用于成批或大批生产齿轮。

3）5 级以上精度的齿轮。一般采用粗滚齿—精滚齿—齿端加工—淬火—校正基准—粗磨齿—精磨齿的加工方案。磨齿是目前齿形加工中精度最高、表面粗糙度参数值最小的加工方法，最高精度可达 3～4 级。

（4）齿端加工

齿轮的齿端加工有倒圆、倒尖、倒棱和去毛刺等方式，如图 6-22 所示。经倒圆、倒尖后的齿轮在换挡时容易进入啮合状态，以减少撞击现象。倒棱可除去齿端尖角和毛刺。图 6-23 所示是用指状铣刀对齿端进行倒圆的加工示意图。倒圆时，铣刀告诉旋转，并沿圆弧作摆动，加工完一个齿后，工件退离铣刀，经分度再快速向铣刀靠近加工下一个齿的齿端。齿端加工必须在淬火之前进行，通常都在滚（插）齿之后、剃齿之前安排齿端加工。

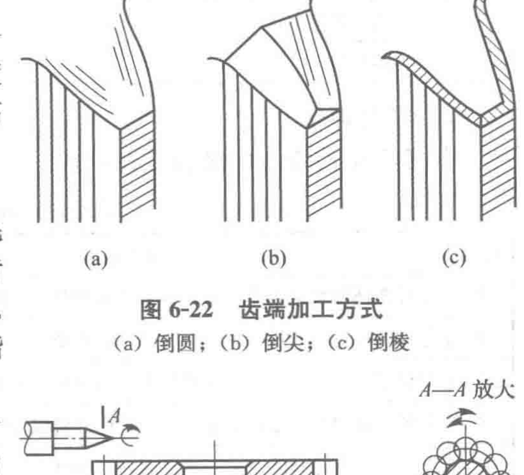


图 6-22　齿端加工方式

（a）倒圆；（b）倒尖；（c）倒棱

图 6-23　齿端倒圆

（5）制定工艺过程

齿轮加工的工艺路线是根据齿轮材质和热处理要求、齿轮结构及尺寸大小、精度要求、生产批量和车间设备条件而定的。一般可归纳成如下的工艺路线：

毛坯制造—齿坯热处理—齿坯加工—齿形加工—齿圈热处理—齿轮定位表面精加工—齿

圈的精整加工。

图 6-1 是某齿轮零件图，表 6-9 是该齿轮的机械加工工艺过程。它采用了滚齿（或插齿）、剃齿、珩齿等工艺。

表 6-9　某齿轮机械加工工艺过程

序号	工序内容及要求	定位基准	设　备
1	锻造		
2	正火		
3	粗车各部，均留余量 1.5 mm	外圆、端面	转塔车床
4	精车各部，内孔至锥孔塞规刻线外露 6～8 mm，其余达图样要求	外圆、内孔、端面	C6132
5	滚齿　$F_W=0.036$ mm　$F''_i=0.10$ mm $f_i=0.022$ mm　$F_\beta=0.011$ mm $W=80^{-0.14}_{-0.19}$ mm　齿面 R_a2.5 μm	内孔、B 端面	Y38
6	倒角	内孔、B 端面	倒角机
7	插键槽达图样要求	外圆、B 端面	插床
8	去毛刺		
9	剃齿	内孔、B 端面	Y5714
10	热处理：齿面淬火后硬度达 50～55HRC		
11	磨内锥孔，磨至锥孔塞规小端平	齿面、B 端面	M220
12	珩齿达图样要求	内孔、B 端面	Y5714
13	终结检验		

4. 任务评价

任务实施检查与评价表见表 6-10。

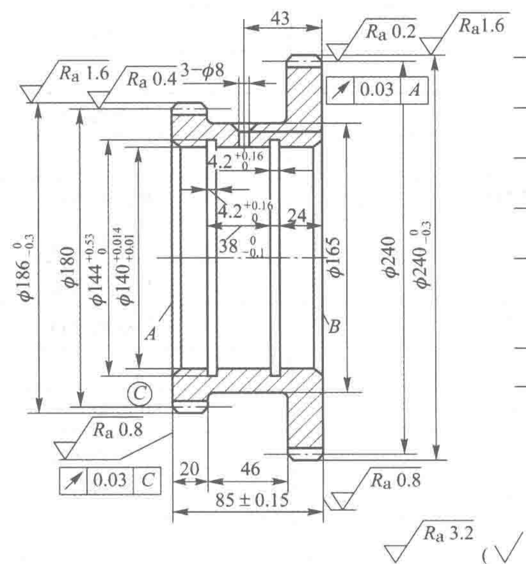
表 6-10　任务实施检查与评价表

<table>
<tr><th>序号</th><th colspan="2">检查内容</th><th>检查记录</th><th>评价</th><th>分值</th></tr>
<tr><td>1</td><td colspan="2">零件图样识别是否充分，结构工艺分析是否正确，是否形成记录</td><td></td><td></td><td>5%</td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="2">零件毛坯选择的可行性与正确性（毛坯图）</td><td></td><td></td><td>10%</td></tr>
<tr><td>3</td><td colspan="2">零件加工顺序制订的合理性与可行性（机械加工工艺过程卡）</td><td></td><td></td><td>20%</td></tr>
<tr><td>4</td><td colspan="2">重要工序内容确定的正确性与合理性（机械加工工序卡）</td><td></td><td></td><td>35%</td></tr>
<tr><td rowspan="4">5</td><td rowspan="4">职业素养</td><td>遵守时间：是否不迟到，不早退，中途不离开现场</td><td></td><td></td><td>10%</td></tr>
<tr><td>5S：理实一体现场是否符合 5S 管理要求，桌椅、参考资料是否按规定摆放，地面、门窗是否干净</td><td></td><td></td><td>10%</td></tr>
<tr><td>团结协作：组内是否配合良好；是否积极投入到本项目中积极完成本任务</td><td></td><td></td><td>5%</td></tr>
<tr><td>语言能力：是否积极回答问题；声音是否洪亮；条理是否清晰</td><td></td><td></td><td>5%</td></tr>
<tr><td>总评</td><td colspan="2"></td><td colspan="3">评价人</td></tr>
</table>

6.9 拓展项目

1. 任务案例

齿轮加工的工艺过程，常因齿轮的结构形状、精度等级、生产批量及各厂生产条件的不同而采用各种不同的方案。图 6-24 所示为批量生产普通车床床头箱齿轮，该齿轮精度要求较高，其中 $z=60$ 的齿轮为 7 级精度；而对 $z=80$ 的齿轮为 6 级精度。



齿数	60	80
模数	3	3
压力角	20°	20°
精度等级	7−FL	6−5−5−FL
公法线平均长度及偏差	$60.088^{-0.15}_{-0.205}$	$78.641^{-0.16}_{-0.21}$
跨测齿数	7	9

技术要求

1. 未注明倒角均为 1×45°。
2. 材料：40C4。
3. 热处理：齿部高频淬火 HRC50~55。

图 6-24 普通车床床头箱齿轮

2. 任务要求

拟定车床床头箱齿轮工艺过程。通过普通车床床头箱齿轮批量生产工艺路线的拟定，使学生进一步对齿轮类零件工艺规程的编制等有所理解和体会，增强学生的学习兴趣，提高学生解决工程技术问题的自信心，体验成功的喜悦。

3. 任务实施

1）编制图 13.2 所示车床床头箱齿轮的加工的工艺规程（每个学生编制一份）。

2）分组推荐出四种有代表性的工艺规程进行优化分析和讨论。

3）在加工工艺规程中穿插中间热处理工序。

4）编制粗加工、半精加工、精加工工序内容，包括确定工件的定位、夹紧方案、切削用量的选择。

5）制定工艺过程，见表 6-11。

表 6-11　普通车床床头箱齿轮加工工艺过程

工序号	工　序　内　容	定位基准
1	锻：锻坯	
2	粗车：粗车内外圆，B 面尽料放长	B 面和外圆
3	热处理：正火	
4	精车：夹 B 端，车 $\phi246^{0}_{-0.3}$，$\phi186^{0}_{-0.3}$及 $\phi165$ 至尺寸；车 $\phi140$ 孔为 $\phi138^{+0.04}_{0}$ 合塞规，光平面，倒角、不切槽；调头，光面留磨量，倒角 1.5×45°	B 面和外圆 A 面和外圆
5	平磨：平磨 B 面 85±0.15	A 面
6	划线：划 3-$\phi8$ 油孔位置线	
7	钻：钻 3-$\phi8$ 油孔，孔口倒角至图样要求	B 面和内孔
8	钳：内孔去毛刺	
9	滚齿：滚齿 $z=80$，$L=78.841^{-0.16}_{-0.21}$（即留磨量 0.2），$n=9$	B 面和内孔
10	插齿：插齿 $z=60$，$L=60.088^{+0.09}_{0}$，$n=7$	B 面和内孔
11	齿倒角：齿倒圆角，去齿部毛刺	B 面和内孔
12	剃齿：剃齿 $z=60$，$L=60.088^{-0.09}_{-0.21}$，$n=7$	B 面和分圆
13	热处理：齿部高频淬火，50～55HRC	
14	精车：精车 $\phi140^{\pm0.014}_{\quad 0.016}$合塞规，车槽至要求	B 面和内孔
15	珩齿，珩齿 $z=60$，$L=60.088^{-0.15}_{-0.205}$，$n=7$	B 面和内孔
16	磨齿：磨齿 $z=80$，$L=78.841^{-0.16}_{-0.21}$，$n=9$	B 面和内孔
17	检验	
18	入库	



1. 说明齿轮零件的功用和结构特点。
2. 齿轮传动的基本要求有哪几个方面？
3. 圆柱齿轮规定了哪些技术要求和精度指标？它们对传动质量和加工工艺有哪些影响？
4. 试比较滚齿与插齿、磨齿和珩齿的加工原理、工艺特点及适用场合。
5. 齿轮的典型加工工艺过程由哪几个加工阶段所组成？其中毛坯热处理和齿面热处理各起什么作用？应安排在工艺过程的哪一阶段？
6. 为滚切高精度齿轮，若其他条件相同，应选取下列情况的哪一种？为什么？①单头滚刀或多头滚刀；②大直径滚刀或小直径滚刀；③标准长度滚刀或加长滚刀；④顺滚或逆滚。
7. 滚切一螺旋角为 15′的左旋高精度斜齿轮，应选取何种旋向的滚刀？为什么？此时滚刀的轴线与齿坯轴线的交角如何确定？
8. 齿轮的加工方法主要有哪些？
9. 简述剃齿的加工原理和使用场合。

10. 齿轮零件的主要检验项目有哪些？每一项的检验方法是什么？

11. 在不同生产类型条件下，齿坯加工是怎样进行的？如何保证齿坯内外圆同轴度及定位用的端面与内孔的垂直度？齿坯精度对齿轮加工精度有什么影响？

12. 选择齿形加工方案的依据是什么？请分析单件小批生产类型常选用磨齿方案的理由。

项目七　机械装配工艺

【知识点】

- 机器装配的基本概念；
- 装配工艺尺寸链的计算；
- 保证装配精度的方法；
- 制定装配工艺规程的原则；
- 制定装配工艺规程的方法与步骤。

【技能点】

- 装配工艺分析；
- 装配工艺系统图；
- 装配方法的选择；
- 装配工艺规程的制定。

7.1　项目导入

1. 任务案例

某企业生产几种型号的滚动轴承，采用自动装配线来装配，年产量都在中批以上。

2. 任务要求

编制滚动轴承自动装配的工艺规程。

3. 任务引导

(1) 阅读装配图，对机器装配尺寸和工艺进行分析，判断其装配工艺性如何。

(2) 确定装配的组织形式，确定固定装配或者移动式装配。

(3) 划分装配单元，主要包括哪几个装配单元?

(4) 确定装配顺序，一般装配顺序是什么?

(5) 装配工序如何划分和设计?

(6) 机器装配工艺规程的编制。

7.2 概 述

7.2.1 基本概念

任何机器都是由许多零件装配而成的。装配是机械制造的最后一个阶段，它包括装配、调整、检验、试验等工作。机器的质量最终是通过装配来保证的，装配质量在很大程度上决定机器的最终质量。另外通过机器的装配过程，可以发现机器设计和零件加工质量等所存在的问题，并加以改进，以保证机器的质量。

1. 装配的概念

所谓装配，是指按规定的技术要求和精度，将构成机器的零件结合成组件、部件或产品的工艺过程。把零件装配成组件，或把零件和组件装配成部件，以及把零件、组件和部件装配成最终产品的过程分别称为组装、部装和总装。

2. 装配单元

一台机械产品往往由上千至上万个零件所组成，为了便于组织装配工作，必须将机械产品分解为若干可以独立进行装配的装配单元，以便于按照单元次序进行装配并有利于缩短装配周期。一般情况下，装配单元可分为五个等级：零件、合件、组件、部件和机器。

1）零件是构成机器和参加装配的最基本单元，它是由整块金属或其他材料制成的。零件一般都安装成套件、组件、部件后才安装到机器上，直接装入机器的零件并不是太多。

2）套件是在一个基准件上，装上一个或若干个零件构成的，它是最小的装配单元。如装配式齿轮（见图 7-1），由于制造工艺原因，分成两个零件，在基准零件 1 上套上齿轮 3 并用铆钉 2 固定。为此进行的装配称为套装。

3）组件是在一个基准零件上，装上若干套件及零件而构成的，如机床箱中的主轴，在基础轴件上装上齿轮、套、垫片、键及轴承的组合件称为组件。为此而进行的装配工作称为组装。

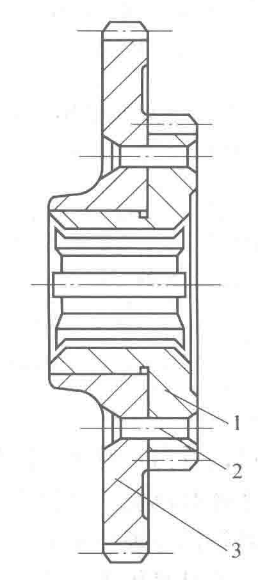


图 7-1 套件——装配式齿轮
1—基准零件 2—铆钉 3—齿轮

4）部件是在一个基准零件上，装上若干个组件、套件和零件构成的。部件在机器中能完成一定的、完整的功用。把零件装配成为部件的过程，称之为部装。例如车床的主轴箱装配就是部装。主轴箱体为部装的准零件。

5）在一个基准零件上，装上若干部件、组件、套件和零件就成为整个机器，把零件和部件装配成最终产品的过程，称之为总装。例如卧式车床就是以床身为基准零件，装上主轴箱、进给箱、溜板箱等部件及其他组件、套件、零件所组成的。

3. 装配生产类型及其特点

机器装配的生产类型，按装配产品的生产批量大小可分为单件小批生产、成批生产和大批大量生产三种类型。生产类型不同，装配工作的组织形式、装配方法、工艺装备等方法也

有所不同，具体见表7-1。

表7-1　各种生产类型装配工作的特点

生产类型		单件生产	批量生产	大量生产
装配工作特点	基本特征	产品经常变换，不定期重复，生产周期较长	产品在系列化范围内变动，分批交替投产或多品种同时投产，生产活动在一定时期内重复	产品固定，生产活动长期重复，生产周期较短
	组织形式	多采用固定装配或固定式流水装配进行总装，同时，对批量较大的部件亦可采用流水装配	笨重的批量不大的产品，多采用固定流水装配，批量较大时，采用流水装配，多品种平行投产时用多品种可变节奏流水装配	多采用流水装配线：有连续移动、间歇移动及可变节奏移动等。还可采用自动装配机或自动装配线
	装配工艺方法	以修配法和调整法为主，互换件比例较少	主要采用互换法，但灵活运用其他保证装配精度的装配方法，如调整法、修配法及合并法	按互换法装配，允许有少量的简单调整，精密偶件成对供应或分组装配
	工艺过程	一般不制订详细工艺文件，工序可适当调动，工艺也可灵活掌握	工艺过程划分必须适合于批量的大小，尽量使生产均衡	工艺过程划分很细，力求达到高度的均衡性
	工艺装备	一般为通用设备及通用工、夹、量具	通用设备较多，但也采用一定数量的专用工、夹、量具以保证装配质量和提高工效	专业化程度高，宜采用专用高效工艺装备，易于实现机械化、自动化
	手工操作要求	手工操作比重大，要求工人有高的技术水平和多方面的工艺知识	手工操作比重不小，技术水平要求较高	手工操作比重小，熟练程度容易提高，便于培养新工人
	应用实例	重型机床、重型机器、气轮机、大型内燃机、大型锅炉	机床、机动车辆、中小型锅炉、矿山采掘机械	汽车、拖拉机、内燃机、滚动轴承、手表、缝纫机、电气开关

可以看出，对于不同的生产类型，它的装配工作的特点都是有内在的联系，而装配工艺方法亦各有侧重。要提高单件小批生产的装配工作的效率，必须注意装配工作的各个特点，保留和发扬合理的部分，改进和废除不合理的做法，以大批大量生产类型所采用方法的装配实质，通过具体措施予以改进和提高。

4. 装配内容

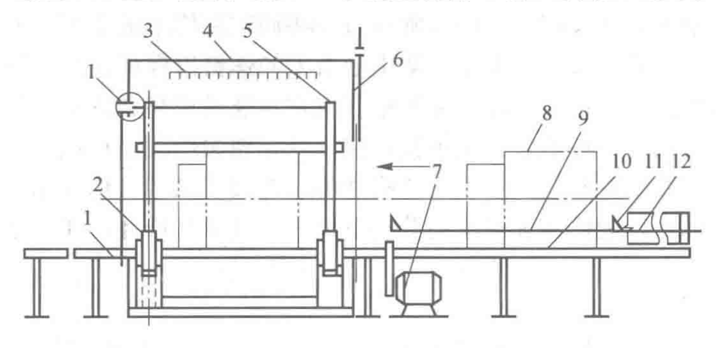
装配过程是一项复杂的工艺过程，它不仅仅是将合格零、部件简单地连接在一起，而且要根据装配的技术要求，通过调整、配作、检验等许多工作，最终保证产品的装配质量。常见的装配工作有以下几项：

（1）清洗

零件加工完毕后在其表面和内部会残存许多油污和机械杂质，装配时必须给予彻底的清洗。这对于保证产品的装配质量和延长产品的使用寿命均有重要的意义。清洗包括清洗液、清洗方法和清洗设备三大要素。常用的清洗液有煤油、碱液和各种水基化学清洗液等。常用的清洗方法有擦洗、浸洗、喷洗、超声波清洗以及综合应用各种清洗方法，组成连续清洗作业的多步清洗生产线等。可根据零件的材料、批量、油污的粘附情况和零件的清洗要求等因

素综合考虑所选用的清洗方法。清洗后一般用压缩空气吹干或加热烘干。

图 7-2 所示为一中型工件半自动清洗机的示意图。主要适用于箱体零件的清洗。工件吊放在清洗机的进口滚道 10 上，送料气缸 12 带动进料杆 9 特工件推入滚筒 5，同时将清洗好



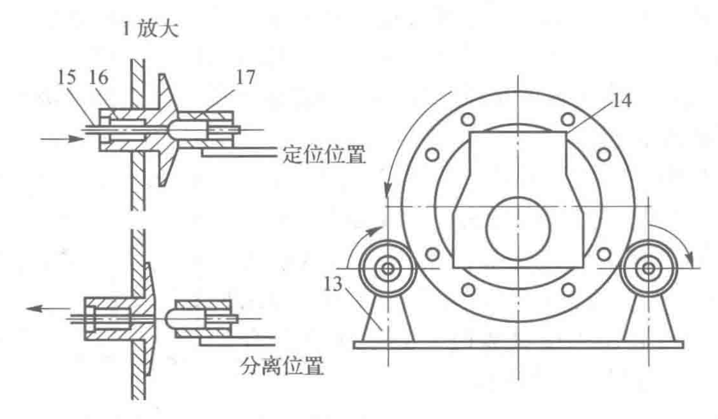


图 7-2　中型装配件通用半自动清洗机

1—出口滚道；2—滚轮；3—喷嘴；4—机体；5—门；7—电动机；8—工件；
9—送料杆；10—进口滚道；11—单向推块；12—送料气缸；13—支架；
14—角铁；15—信号杆；16—伞形座；17—定位销

的工件推出清洗机外。滚筒的内腔有四个角铁 14，用来给箱形零件定位并防止在清洗过程中工件随同滚筒转动发生撞击。工件进入清洗位置时，通过限位开关发出信号，起动电动机，使前后密封门落下，清洗区实现密封。门在下落时，撞出限位开关，使装在清洗机体壁上的伞形座 16 退出，与滚筒 5 上的定位销 17 分离，发出信号使滚筒连同工件缓慢回转，同时起动水泵，压送清洗液自动喷洗工件，工件按规定时间清洗后，由时间继电器控制气缸使伞形座伸入，待定位销插入伞形座后，推动信号杆 15 发出信号，电动机和水泵停止，前后门上升，送料杆将工件推出，并准备下一个工件的清洗。

(2) 连接

连接是装配过程中最基本的工作之一，可分为可拆卸连接和不可拆卸连接两种方式。

可拆卸连接的特点是零件拆卸时不损坏，可以多次拆卸和重新装配，如螺纹连接。螺纹连接时应使螺栓和螺母正确地旋紧，不应有歪斜和弯曲的情况。为了保证连接零件的长期稳固性，装配时应保证给予一定的拧紧力矩。要求较高时可使用指针式扭力扳手来测定。为了提高劳动生产率和降低劳动强度，在成批以上生产中，常使用各种电动扳手或气动扳手等机

动工具来实现螺纹的装配。

不可拆卸连接的特点是如要拆卸必然损坏某些零件，如焊接、胶接和过盈配合等。

(3) 调整和修配

为了保证装配精度，在装配过程中常常进行一些调整和修配的工作。如修刮车床尾座底板，保证床头和尾座两顶尖等高，调整刀架中溜扳上的螺钉以保证进给丝杆与螺母间的轴向间隙等。除位置精度以外，运动精度和接触精度也常常通过调整和修刮来达到。如为了保证轴与滑动轴承的配合要求，按轴去配刮轴瓦；按床身导轨去配刮溜板或工作台的导轨等。

经过仔细地凋整后，有时还要进行一些附加的钳工或机加工工作，如配钻、配铰等，将调整好的位置固定下来。配作使装配时的劳动量增大，且无互换性，在大批大量生产中应尽量避免。

(4) 平衡

对于转速较高并要求运转平稳的回转部件（如精密磨床和电动机的主轴），为了防止运转时出现振动，尽管在机械加工过程中零件已经进行了平衡，装配时还应当对部件进行平衡试验。直径较大厚度较小的零部件采用静平衡，长径比较大的零部件则用动平衡。然后用补焊、螺纹连接的方法加配质量或者用铣、钻等方法去除金属，以达到平衡的目的。

(5) 密封性及强度试验

对于在使用过程中经受各种介质（液体或气体）压力作用的零件和部件，装配时必须进行密封性及强度试验。

图 7-3 所示是用压辅空气试验部件密封性的示意图。强度试验用的介质一般为液体，压力为额定工作压力的125%～150%。在进行高压强度试验时，必须注意安全，道常在试验场地应有一定的防护措施。

图 7-3　密封性实验

(6) 检验和试车

机器装配后应根据有关技术标准和产品验收条件进行逐项检验。对其中不合格的项目进行补充调整。最后进行空运转试车和有载试车，并逐项检查和调试直至其性能完全符合要求为止。

7.2.2　装配工艺性

机器结构的装配工艺性同零件结构的机械加工工艺性一样，对整个生产过程有较大的影响，也是评价机器设计的指标之一。机器结构的装配工艺性在一定程度上决定了装配过程周期的长短、耗费劳动量的大小、成本的高低以及机器使用质量的优劣等。

机器结构的装配工艺性是指机器结构能保证装配过程中使相互联接的零部件不用或少用修配和机械加工，用较少的劳动量，花费较少的时间按产品的设计要求顺利地装配起来。

根据机器的装配实践和装配工艺的需要对机器结构的装配工艺性提出以下基本要求。

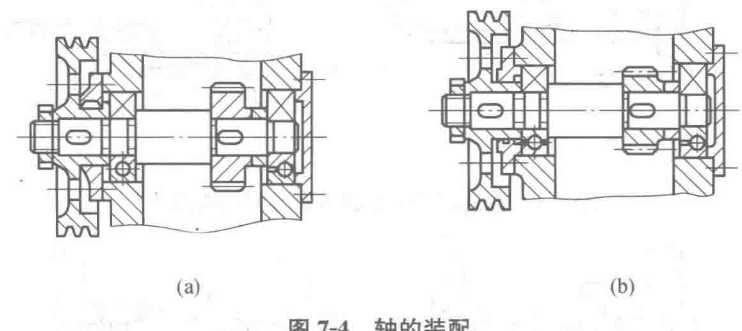
1. 机器结构应能分成独立的装配单元

为了最大限度地缩短机器的装配周期，有必要把机器分成若干独立的装配单元，以便使许多装配工作同时平行进行，它是评定机器结构装配工艺的重要标志之一。

所谓独立的装配单元就是要求机器结构能划分成独立的组件、部件等。首先按组件或部件分别进行装配，然后进行检验或试车，最后再进行总装配。这样，不仅可以缩短装配周

期、减少总装配工作量，还可以保证总机的装配质量，便于维修、包装和运输，并利于产品的改进和更新换代。

图 7-4 所示为轴的装配，当轴上齿轮直径大于箱体轴承孔时（见图 7-4（a），轴上零件需依次在箱内装配。当齿轮直径小于轴承孔时（见图 7-4（b），轴上零件可在组装成组件后，一次装入箱体内，从而简化装配过程，缩短装配周期。



(a)　　(b)

图 7-4　轴的装配

把机器划分成独立的装配单元有下述好处：

1）可组织平行的装配作业，各单元装配互不妨碍，缩短装配周期，或便于组织多厂协作。

2）机器的有关部件可以预先进行调整和试车，各部件以较完善的状态进入总装，这样既可保证总装的质量，又可以减少总装配的工作量。

3）机器局部结构改进后，整个机器只是局部变动，使机器改装起来方便，有利于产品的改进和更新换代。

4）有利于机器的维护检修、给重型机器的包装，运输带来很大的方便。

另外，有关精密零部件，不能在使用现场进行装配，而只能在特殊（如高度洁净、恒温等）环境里进行装配及调整，然后以部件的形式进入总装配。例如，精密丝杠车床的丝杠就是在特殊的环境下装配的，以便保证机器的精度。

2. 减少装配时的修配和机械加工

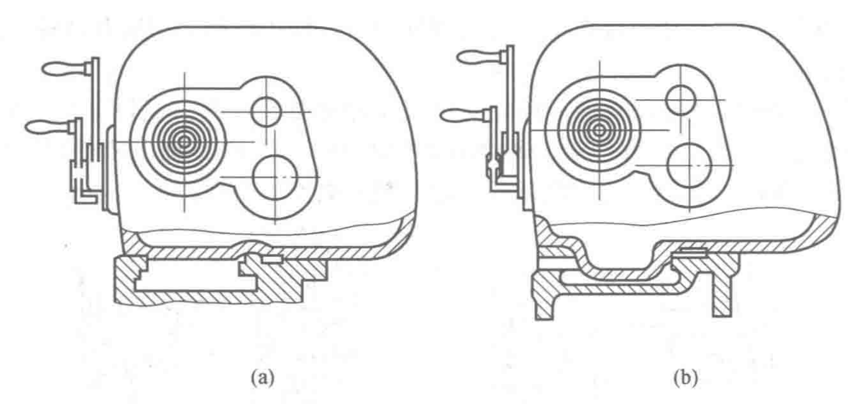
多数机器在装配过程中，难免需要对某些零部件进行修配，这不仅增加了难以事先确定的装配工作量，还要依赖工人较高的操作技艺。因此，装配过程中要尽量减少修配工作量。

首先，要尽量减少不必要的配合面。这是因为配合面过大、过多，零件机械加工就困难，装配时修刮量也必然增加。

图 7-5 所示为车床主轴箱与床身的装配结构，主轴箱如采用图 7-5（b）所示山形导轨定位，此时，基准面修刮工作量大，现采用图 7-5（a）所示平导轨定位，则装配工艺得到明显的改善。

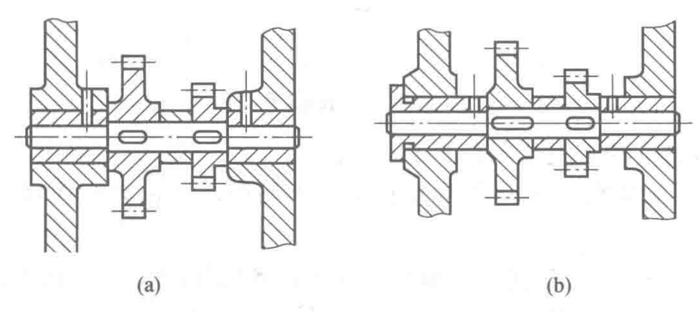
其次，要尽量减少机械加工。在装配过程中，机械加工工作越多，装配工作越不连续，装配周期越长；同时加工设备既占面积，又易引起装配工作混乱，其加工切屑还有可能造成机器不必要磨损，甚至产生严重事故而损坏整个机器。

图 7-6 所示为两种不同的轴润滑结构，图 7-6（a）所示结构需要在轴套装配后，在箱体上配钻油孔，使装配产生机械加工工作量。图 7-6（b）所示结构改在轴套上预先加工好油孔，便可消除装配时的机械加工工作量。



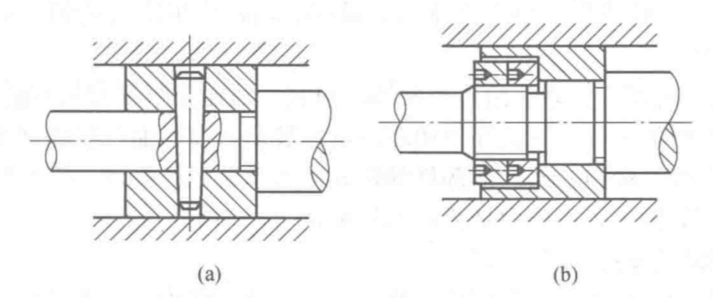
(a) (b)

图 7-5　主轴箱与床身的不同装配结构形式



(a) (b)

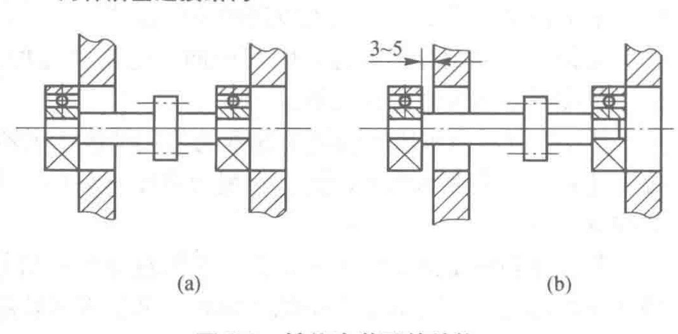
图 7-6　两种不同的轴上油孔结构



(a) (b)

图 7-7　两种活塞连接结构

如图 7-7 所示，将图 7-7（a）活塞上配钻销孔的销钉连接改为图 7-7（b)所示的螺纹连接，从根本上取消了装配中的机械加工。



(a) (b)

图 7-8　轴依次装配的结构

3. 机器结构应便于拆卸与维修

1）机器的结构设计应使装配工作简单、方便。其重要的一点是组件的几个表面不应该同时装入基准零件的配合孔中，而应该有先后次序进入装配。

如图 7-8（a）所示，轴上的两个轴承同时装入箱体零件的配合孔中，既不便于观察，导

向性又差，给装配工作带来困难。若改为图 7-8（b）所示的结构形式，轴上的右轴承先行装入孔中 3～5mm 时，左轴承再开始装入，即可使装配工作简单方便。

此外，扳手工作空间过小、螺栓拧入深度不够等都会导致装配困难。

2）机器的结构设计应便于拆卸检修。由于磨损及其他原因，所有易损零件都要考虑拆卸方便问题。

如图 7-9（a）所示的轴承在更换时很难拆卸下来，若改为图 7-9（b）所示结构就容易拆卸。

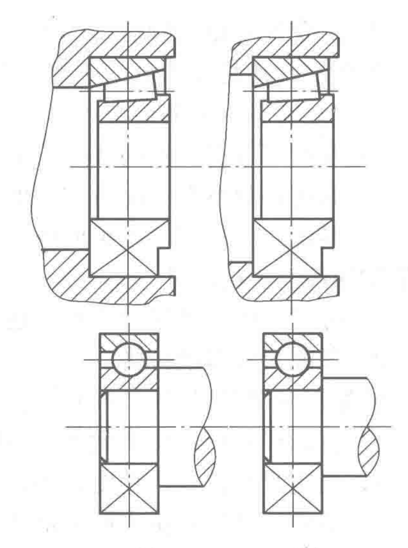


图 7-9　轴承的结构应考虑拆卸方便

在图 7-10（a）中，定位销孔为不通孔，取出定位销很困难，若改为图 7-10（b）所示的通孔结构或图 7-10（c）所示的带有螺纹孔的定位销，就可方便地取出定位销。

装配工艺性问题看似简单，但对装配工作有重要影响，必须给予足够重视。

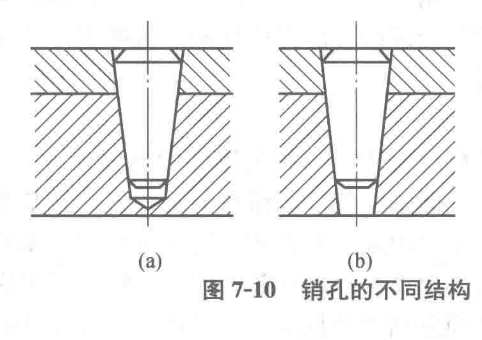
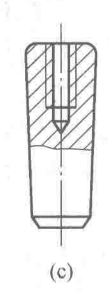



图 7-10　销孔的不同结构

7.3　装配尺寸链

7.3.1　基本概念

机器的质量，主要取决于机械结构设计的正确性、零件的加工质量，以及机器的装配精度，零件的精度又是影响机器装配精度的最主要因素。通过建立，分析计算装配尺寸链，可以解决零件精度与装配精度之间的关系。

1. 装配尺寸链基本概念

装配尺寸链是产品或部件在装配过程中，由相关零件的尺寸或位置关系所组成的封闭的尺寸组。它由一个封闭环和若干个与封闭环关系密切的组成环组成。

装配尺寸链的封闭环就是装配所要保证的装配精度或技术要求。装配精度（封闭环）是零部件装配后才最后形成的尺寸或位置关系。

在装配关系中，对装配精度有直接影响的零、部件的尺寸和位置关系，都是装配尺寸链的组成环。如同工艺尺寸链一样，装配尺寸链的组成也分为增环和减环。

2. 装配尺寸链的特点

装配尺寸链是尺寸链的一种。与一般尺寸链相比，它除有共同的特性（封闭性和关联性）外，还具有以下典型特点：

1）装配尺寸链的封闭环是十分明显的，它是机器产品或部件的某项装配精度。

2）封闭环只有在装配后才能形成，不具有独立性。

3）装配尺寸链中的各组成环不是仅在一个零件上的尺寸，而是在几个零件或部件之间与装配精度有关的尺寸。

4）除常见的线性尺寸链外，还有角度尺寸链、平面尺寸链和空间尺寸链等。

3. 装配尺寸链的分类

装配尺寸链可以按各环的几何特征和所处空间位置不同分为以下四类：

1）直线尺寸链：由长度尺寸组成，且各尺寸彼此平行。

2）角度尺寸链：由角度、平行度、垂直度等构成。

3）平面尺寸链：由构成一定角度关系的长度尺寸及相应的角度尺寸（或角度关系）构成，且处于同一或彼此平行的平面内。

4）空间尺寸链：由位于空间相交平面的直线尺寸和角度尺寸（或角度关系）构成。

在装配尺寸链中，装配精度是封闭环，相关零件的设计尺寸是组成环。如何查找对某装配精度有影响的相关零件，进而选择合理的装配方法和确定这些零件的加工精度，是建立装配尺寸链和求解装配尺寸链的关键。

4. 装配尺寸链的查找方法

装配尺寸链是产品或部件在装配过程中，由相关零件的有关尺寸（表面或轴线间距离）或相互位置关系（平行度、垂直度或同轴度等）所组成的尺寸链。其基本特征依然是尺寸组合的封闭性，即由一个封闭环和若干个组成环所构成的尺寸链呈封闭图形。当运用装配尺寸链的原理去分析和解决问题时，首先要正确地建立起装配尺寸链，即正确确定封闭环，并根据封闭环的要求查明各组成环，下面分别介绍长度尺寸链和角度尺寸链的建立方法。

首先，介绍长度装配尺寸链的建立方法。

（1）封闭环与组成环的查找

装配尺寸链的封闭环多为产品或部件的装配精度，凡对某项装配精度有影响的零部件的有关尺寸或相互位置精度即为装配尺寸链的组成环。查找组成环的方法：从封闭环两边的零件或部件开始，沿着装配精度要求的方向，以相邻零件装配基准间的联系为线索，分别由近及远地去查找装配关系中影响装配精度的有关零件，直至找到同一基准零件的同一基准表面为止，这些有关尺寸或位置关系，即为装配尺寸链中的组成环。然后画出尺寸链图，判别组成环的性质。如图 7-15 所示装配关系中，主轴锥孔轴心线与尾座轴心线对溜板移动的等高度要求 A_0 为封闭环，按上述方法很快查找出组成环为 A_1，A_2 和 A_3，画出装配尺寸链（见图 7-15（b））。

（2）建立装配尺寸链的注意事项

1）装配尺寸链中装配精度就是封闭环。

2）按一定层次分别建立产品与部件的装配尺寸链。机械产品通常都比较复杂，为便于装配和提高装配效率，整个产品多划分为若干部件，装配工作分为部件装配和总装配，因此，应分别建立产品总装尺寸链和部件装配尺寸链。产品总装尺寸链以产品精度为封闭环，

以总装中有关零部件的尺寸为组成环。部件装配尺寸链以部件装配精度要求为封闭环（总装时则为组成环），以有关零件的尺寸为组成环。这样分层次建立的装配尺寸链比较清晰，表达的装配关系也更加清楚。

3）在保证装配精度的前提下，装配尺寸链组成环可适当简化。图 7-11 所示为车床头尾座中心线等高的装配尺寸链。图中各组成环的意义如下：

A_1——主轴轴承孔轴心线至底面的距离；

A_2——尾座底板厚度；

A_3——尾座孔轴心线至底面的距离；

e_1——主轴滚动轴承外圈内滚道对其外圆的同轴度误差；

e_2——顶尖套锥孔相对外圆的同轴度误差；

e_3——顶尖套与尾座孔配合间隙引起的偏移量（向下）；

e_4——床身上安装主轴箱和尾座的平导轨之间的等高度。

通常由于 $e_1 \sim e_4$ 的公差数值相对于 $A_1 \sim A_3$ 的公差很小，故装配尺寸链可简化成图 7-15（b）所示。

4）确定相关零件的相关尺寸应采用“尺寸链环数最少”原则（亦称最短路线原则）。由尺寸链的基本理论可知，封闭环公差等于各组成环公差之和。当封闭环公差一定时，组成环越少，各环就越容易加工，因此每个相关零件上仅有一个尺寸作为相关尺寸最为理想，即用相关零件上装配基准间的尺寸作为相关尺寸。同理，对于总装配尺寸链来说，一个部件也应当只有一个尺寸参加尺寸链。

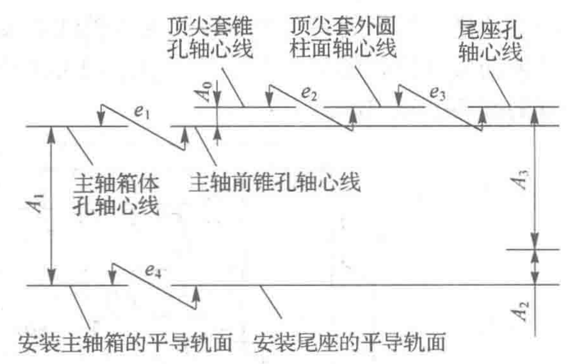


图 7-11　车床头尾座中心线等高的装配尺寸链

图 7-12（a）所示是一车床尾座顶尖套装配图，装配时，要求后盖 3 装入后螺母 2 后在尾座套筒内的轴向窜动不大于某一数值。如果后盖尺寸标注不同，就可建立两个不同的装配尺寸链。图 7-12（c）较图 7-12（b）多了一个组成环，其原因是和封闭环 A_0 直接有关的凸台高度 A_3 由尺寸 B_1 和 B_2 间接获得，即相关零件上同时出现两个相关尺寸，这是不合理的。

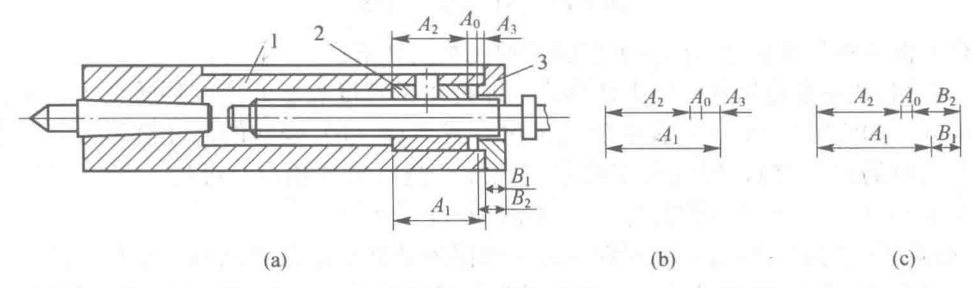


图 7-12　车床尾座顶尖套装配图及尺寸链

1 —顶尖套；2 —螺母；3 —后盖

5）当同一装配结构在不同位置方向有装配精度要求时，应按不同方向分别建立装配尺寸链。例如，常见的蜗杆副结构，为保证正常啮合，蜗杆副中心距、轴线垂直度以及蜗杆轴

线与蜗轮中心平面的重合度均有一定的精度要求，这是三个不同位置方向的装配精度，因而需要在三个不同方向建立尺寸链。

其次，介绍角度装配尺寸链的建立方法。

角度装配尺寸链的封闭环就是机器装配后的平行度、垂直度等技术要求。尺寸链的查找方法与长度装配尺寸链的查找方法相同。

图 7-13 所示的装配关系中，铣床主轴中心线对工作台面的平行度要求为封闭环。分析铣床结构后知道，影响上述装配精度的有关零件有工作台、转台、床鞍、升降台和床身等。其相应的组成环为：

α_1——工作台面对其导轨面的平行度；

α_2——转台导轨面对其下支承平面的平行度；

α_3——床鞍上平面对其下导轨面的平行度；

α_4——升降台水平导轨对床身导轨的垂直度；

α_5——主轴回转轴线对床身导轨的垂直度。

为了将呈垂直度形式的组成环转化成平行度形式，可作一条和床身导轨垂直的理想直线。这样，原来的垂直度就转化为主轴轴心线和升降台水平导轨相对于理想直线的平行度，其装配尺寸链如图 7-13 所示，它类似于线性尺寸链，但是基本尺寸为零，可应用线性尺寸链的有关公式求解。

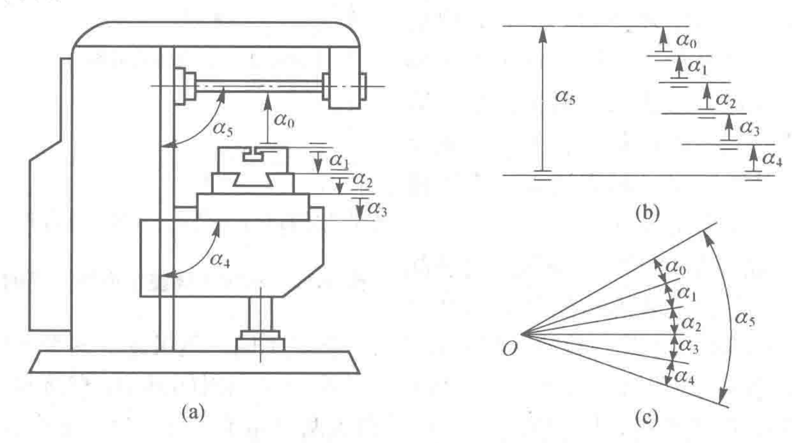


图 7-13　角度装配尺寸链

结合上例可将角度尺寸链的计算步骤的原则简述如下：

1）转化和统一角度尺寸链的表达形式。即把用垂直度表示的组成环转化为以平行度表示的组成环。如将图 7-13（a）表达形式转化为图 7-13（b）表达的尺寸链形式（二者都称为无公共顶角的尺寸链），假设各基线在左侧或右侧有公共顶点，可进一步将图 7-13（b）转化为图 7-13（c）的形式（称具有公共顶角的角度尺寸链）。

2）增减环的判定。增减环的判别通常是根据增减环的定义来判断，在角度尺寸链的平面图中，根据角度环的增加或减少来判别对封闭环的影响，从而确定其性质。图 7-13 的尺寸链中可以判断 α_5 是增环，α_1，α_2，α_3，α_4 是减环。

7.3.2　装配尺寸链的计算方法

装配方法与装配尺寸链的解法密切相关。同一项装配精度，采用不同装配方法时，其装配尺寸链的计算方法也不相同。

装配尺寸链的计算可分为正计算和反计算。正计算用于对已设计的图纸进行校核验算，已知与装配精度有关的各零部件的基本尺寸及其偏差，求解装配精度要求（封闭环）的基本尺寸及其偏差的计算过程。反计算主要用于产品设计过程之中，以确定各零部件尺寸和加工精度，已知装配精度要求（封闭环）的基本尺寸及其偏差，求解与该项装配精度有关的各零部件基本尺寸及偏差的计算过程。

装配尺寸链的计算方法有两种：极值法和概率法。

1. 极值法

极值法的基本公式是

$$T_0 \geqslant \sum_{i=1}^{m} T_i \tag{7.1}$$

有关计算公式用于装配尺寸链时，常有以下几种情况：

1）正计算。正计算用于验算设计图样中某项精度指标是否能够达到要求，即装配尺寸链中的各组成环的基本尺寸和公差定得正确与否，这项工作在制定装配工艺规程时也是必须进行的。

2）反计算。反计算就是已知封闭环，求解组成环。用于产品设计阶段，根据装配精度指标来计算和分配各组成环的基本尺寸和公差。这种问题解法多样，需根据零件的经济加工精度和恰当的装配工艺方法来具体确定分配方案。

3）中间计算。中间计算常用在结构设计时，将一些难加工的和不宜改变其公差的组成环的公差先确定下来，其公差值应符合国家标准的规定，并按“入体原则”标注。然后将一个比较容易加工或容易装拆的组成环作为试凑对象，这个环称为协调环，如修配法中的修配环，调整法中的调整环。

4）极值法的特点。极值法的优点是简单可靠，但其封闭环与组成环的关系是在极端情况下推演出来的，即各项尺寸要么是上极限尺寸，要么是下极限尺寸。这种出发点与批量生产中工件尺寸的分布情况显然不符，因此造成组成环公差带很小，制造困难。在封闭环要求高、组成环数目多时，尤其是这样。

从加工误差的统计分析中可以看出，加工一批零件时，尺寸处于公差中心附近的零件属多数，接近极限尺寸的是极少数。在装配中，碰到极限尺寸零件的机会不多，而在同一装配中的零件恰恰都是极限尺寸的机会就更为少见。

因此，应从统计学角度出发，把各个参与装配的零件尺寸视为随机变量才是合理的、科学的。

2. 概率法

概率法的基本公式是

$$T_0 \geqslant \sqrt{\sum_{i=1}^{m} T_i} \tag{7.2}$$

用概率法的好处在于放大了组成环的公差，且仍能保证达到装配精度要求。尚需说明的

是：由于应用概率法时需要考虑各环的分布中心，计算起来比较烦琐，所以在实际计算时常将各环改写成平均尺寸，公差按双向等偏差标注。计算完毕后，再按“入体原则”标注。

3. 装配工艺方法与计算方法的组合

机器装配中所采用的装配工艺方法及解算装配尺寸链所采用的计算方法必须密切配合，才能得到满意的装配效果。装配工艺方法与计算方法常用的匹配如下：

1）采用完全互换法时，应用极值法计算。完全互换且属于大批大量生产或环数较多时，可改用概率法计算。

2）采用不完全互换法时，可用概率法计算。

3）采用分组装配法时，一般都按极值法计算。

4）采用修配法时，一般情况下批量小，应按极值法计算。

5）采用调整法时，一般用极值法计算。大批大量生产时，可用概率法计算。

7.4 保证装配精度的装配方法

7.4.1 装配精度

装配精度是指机器装配以后，各工作面间的相对位置和相对运动等参数与规定指标的符合程度。是装配工艺的质量指标，可根据机器的工作性能来确定。正确地规定机器和部件的装配精度是产品设计的重要环节之一，它不仅关系到产品质量，也影响产品制造的经济性。装配精度是制订装配工艺规程的主要依据，也是选择合理的装配方法和确定零件加工精度的依据。所以，应正确规定机器的装配精度。

1. 基本概念

机器的装配精度是按照机器的使用性能要求而提出的，可以根据国际标准、国家标准、部颁标准、行业标准或其他有关资料予以确定，一般包括以下几个方面：

1）尺寸精度。尺寸精度是指装配后相关零部件的距离精度和配合精度。如轴孔的配合间隙或过盈，车床床头和尾座两顶尖的等高度等。

2）位置精度。位置精度是指装配后零部件间应该保证的平行度、垂直度、同轴度和各种跳动等。如普通车床溜板移动对尾座顶尖套锥孔轴心的平行度、卧式铣床刀杆轴心线和工作台的平行度等。

3）相对运动精度。相对运动精度是指装配后有相对运动的零部件间在运动方向和运动准确性上应保证的要求。如普通车床尾座移动对溜板移动的平行度，滚齿机滚刀主轴与工作台相对运动的准确性等。

4）接触精度。接触精度是指两配合表面、接触表面和连接表面间达到规定的接触面积和接触点分布的情况。它影响到部件的接触刚度和配合质量的稳定性。例如齿轮侧面接触精度要控制沿齿高和齿长两个方向上接触面积大小及接触斑点数。接触精度影响接触刚度和配合质量的稳定性，它取决于接触表面本身的加工精度和有关表面的相互位置精度。

不难看出，上述各装配精度之间存在密切的关系相互位置精度是相对运动精度的基础，尺寸精度和接触精度对相互位置精度和相对运动精度的实现又有较大影响。

2. 装配精度与零件精度间的关系

机器及其部件都是由零件所组成。显然，零件的精度特别是关键零件的加工精度，对装配精度有很大影响。如图 7-14 所示，普通车床尾座移动对溜板移动的平行度要求，就主要取决于床身上溜板移动的导轨 A 与尾座移动的导轨 B 的平行度以及导轨面间的接触精度。一般而言，多数的装配精度是和它相关的若干个零部件的加工精度有关，所以应合理地规定和控制这些相关零件的加工精度，在加工条件允许时，它们的加工误差累积起来，仍能满足装配精度的要求。但是，当遇到有些要求较高的装配精度，如果完全靠相关零件的制造精度来直接保证，则零件的加工精度将会很高，给加工带来较大的困难。如图 7-15 所示，普通车床床头和尾座两顶尖的等高度要求，主要取决于主轴箱 1、尾座 2、底板 3 和床身 4 等零部件的加工精度。该装配精度很难由相关零部件的加工精度直接保证。在生产中，常按较经济的精度来加工相关零部件，而在装配时则采用一定的工艺措施(如选择、修配、调整等措施)，从而形成不同的装配方法，来保证装配精度。本例中，采用修配底板 3 的工艺措施保证装配精度，这样做，虽然增加了装配的劳动量，但从整个产品制造的全局分析，仍是经济可行的。

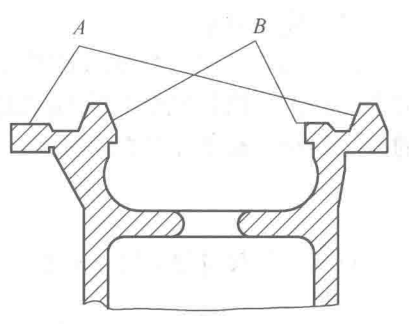


图 7-14　床身导轨简图

A —溜板移动导轨；B —尾座移动导轨

由此可见，产品的装配精度和零件的加工精度有密切的关系，零件精度是保证装配精度的基础，但装配精度并不完全取决于零件的加工精度。装配精度的保证，应从产品的结构、机械加工和装配方法等方面进行综合考虑，而将尺寸链的基本原理应用到装配中，即建立装配尺寸链和解装配尺寸链是进行综合分析的有效手段。

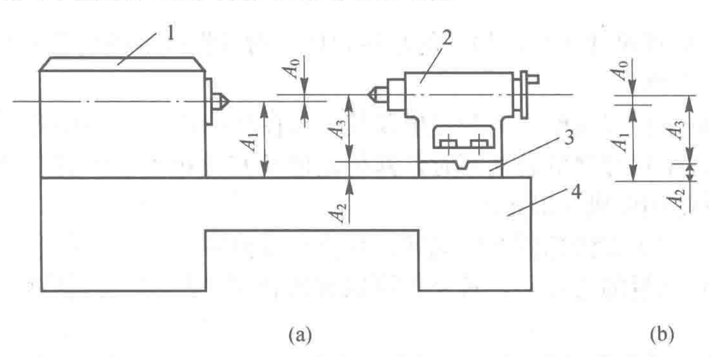


图 7-15　床头箱主轴与尾座套筒中心线等高示意图

7.4.2　装配方法

机械产品的精度要求，最终要靠装配实现的。生产中保证产品精度的具体方法有许多种，经过归纳可分为：互换法、选配法、修配法和调整法四大类。而且同一项装配精度，因采用的装配方法不同，其装配尺寸链的解算方法亦不相同。现分述如下：

1. 互换法

互换法就是装配过程中，零件互换后仍能达到装配精度要求的一种方法。产品采用互换

装配法时，装配精度主要取决于零件的加工精度。其实质就是用控制零件的加工误差来保证产品的装配精度。按互换程度的不同，互换装配法又分为完全互换法和大数互换法两种。

（1）完全互换法

在全部产品中，装配时各零件不需挑选、修配或调整就能保证装配精度的装配方法称为完全互换法。选择完全互换装配法时，其装配尺寸链采用极值公差公式计算，即各有关零件的差之和小于或等于装配公差：

$$T_{\alpha} \geqslant \sum_{i=1}^{m} |\xi_i| T_i \tag{7.3}$$

对于直线尺寸链：$|\xi_i| = 1$ 。

$$T_{\alpha} \geqslant \sum_{i=1}^{m} T_i = T_1 + T_2 + \cdots + T_m \tag{7.4}$$

式中　T_{α} ——封闭环极值公差；

T_i ——第 i 个组成环公差；

ξ_i ——第 i 个组成环传递系数；

m ——组成环环数。

在进行装配尺寸链反计算时，即已知封闭环的公差 T_{α}，分配有关零件公差 T_i 时，可按“等公差”原则先确定它们的平均值公差 T_{avl} ：

$$T_{avl} = \frac{T_0}{\sum_{i=1}^{m} |\xi_i|} \tag{7.5}$$

对于直线尺寸链：$|\xi_i| = 1$ 。

$$T_{avl} = \frac{T_0}{m} \tag{7.6}$$

然后根据各组成环尺寸大小和加工的难易程度，对各组成环的公差进行适当的调整。在调整时可参照以下原则：

1）组成环是标准件尺寸时，其公差值及其分布在相应标准中已有规定，应为确定值。

2）组成环是几个尺寸链的公共环时，其公差值及其分布由其中要求最严的尺寸链现行确定，对其余尺寸链则应成为确定值。

3）尺寸相近、加工方法相同的组成环，其公差值相等。

4）难加工或难测量的组成环，其公差可取较大数值。易加工、易测量的组成环，其公差取较小数值。

在确定各组成环的极限偏差时，按“入体原则”确定，即组成环为包容面时，取下偏差为零；组成环为被包容面时，取上偏差为零。若组成环是中心距，则偏差按对称分布。按上述原则确定偏差后，有利于组成环的加工。

但是，当各组成环都按上述原则确定偏差时按公式计算的封闭环极限偏差常不符合封闭环的要求值。因此就需选取一个组成环，它的极限偏差不是事先定好，而是经过计算确定，以便与其他组成环协调，最后满足封闭环极限偏差的要求，这个组成环称为协调环。一般协调环不能选取标准件或几个尺寸链的公共组成环。其余计算公式的解算同工艺尺寸链，不再赘述。

采用完全互换法进行装配，使装配质量稳定可靠，装配过程简单，生产率高，易于组织

流水作业及自动化装配，也便于采用协作方式组织专业化生产。但是当装配精度要求较高，尤其组成环较多时，零件就难以按经济精度制造。因此，这种装配方法多用于高精度的少环尺寸链或低精度多环尺寸链中。

（2）大数互换法

大数互换法是指在绝大多数产品中，装配时各零件不要挑选、修配或调整就能保证装配精度要求的装配方法。该方法尺寸链计算采用概率法公差公式计算，即当各组成环呈正态分布时，各有关零件公差值的平方之和的平方根小于或等于装配公差。

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} T_i^2} \leqslant T_0 \tag{7.7}$$

若各组成环的公差相等，则可得各组成环的平均公差 T_M 为

$$T_{\mathrm{M}} = \frac{T_0}{\sqrt{m+n}} = \frac{\sqrt{m+n}}{m+n} T_0 \tag{7.8}$$

将上式和极值法的 $T_{\mathrm{M}} = \frac{1}{m+n} T_0$ 相比，可知概率法将组成环的平均公差扩大了 $\sqrt{m+n}$ 倍。其他计算与完全互换法相同。可见，大数互换法的实质是使各组成环的公差比完全互换法所规定的公差大，从而使组成环的加工比较容易，降低了加工成本。但是，封闭环公差在正态分布下的取值范围为 6σ，对应此范围的概率为 0.997 3，即合格率并非 100%，结果会使一些产品装配后超出规定的装配精度，实际生产常忽略不计。

大数互换法的特点和完全互换法的特点相似，只是互换程度不同。大数互换法采用概率法计算，因而扩大了组成环的公差，尤其是在环数较多，组成环又呈正态分布，扩大的组成环公差最显著，因而对组成环的加工更为方便。但是，会有少数产品超差。为了避免超差，采用大数互换法时，应有适当的工艺措施。大数互换法常应用于生产节拍不是很严格的成批生产。例如，机床和仪器仪表等产品中，封闭环要求较宽的多环尺寸链应用较多。

2. 选配法

在成批或大量生产条件下，对于组成环少而装配精度要求很高的尺寸链，若采用完全互换法，则零件的公差会很小，使得加工变得非常困难，在这种情况下可采用选择装配法（简称选配法）。该方法是将组成环的公差放大到经济可行的程度，然后选择合适的零件进行装配，以保证规定的装配精度。选择装配法有三种：直接选配法、分组选配法和复合选配法。下面举例说明采用分组选配法时尺寸链的计算方法。

图 7-16 所示活塞与活塞销的连接情况，活塞销外径 $d=\phi 28^{0}_{-0.0025}$ mm，相应的销孔直径 $D=\phi 28^{-0.0050}_{-0.0075}$ mm。根据装配技术要求，活塞销孔与活塞销在冷态装配时应有 0.002 5～0.007 5mm 的过盈，与此相应的配合公差仅为 0.005mm。若活塞与活塞销采用完全互换法装配，销孔与活塞销直径的公差按“等公差”分配时，则它们的公差只有 0.002 5mm。显然，制造这样精度的销和销孔都是很困难的，也很不经济的。

实际生产中则是先将上述公差值放大四倍，这时销的直径 $d=\phi 28^{0}_{-0.010}$ mm，销孔的直径 $D=\phi 28^{-0.0050}_{-0.0015}$ mm，这样就可以采用高效率的无心磨和金刚镗分别加工活塞外圆和活塞销孔，然后用精密仪器进行测量，并按尺寸大小分成四组，涂上不同的颜色加以区别（或装入不同的容器内）。并按对应组进行装配，即大的活塞销配大的活塞销孔，小的活塞销配小的活塞销孔，装配后仍能保证过盈量的要求。具体分组情况见图 7-16（b）和表 7-2。同样颜

色的销与活塞可按互换法装配。

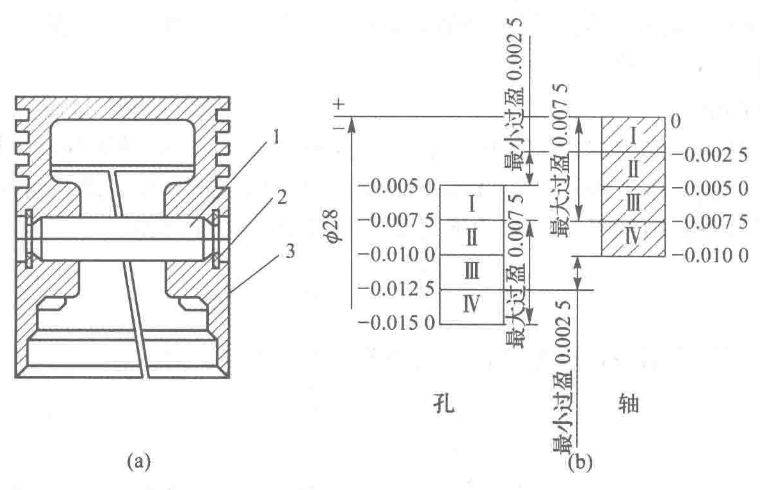


图 7-16　活塞与活塞销连接

1—活塞销；2—挡圈；3—活塞

表 7-2　活塞销和活塞销孔的分组尺寸

组　别	标志颜色	活塞销直径 $d=\phi28_{-0.010}^{0}$	活塞销孔直径 $D=\phi28_{-0.015}^{-0.005}$	配合情况	
				最小过盈量	最大过盈量
Ⅰ	红	$\phi28_{-0.0025}^{0}$	$\phi28_{-0.0075}^{-0.0050}$	−0.002 5	−0.007 5
Ⅱ	白	$\phi28_{-0.0050}^{-0.0025}$	$\phi28_{-0.0100}^{-0.0075}$		
Ⅲ	黄	$\phi28_{-0.0075}^{-0.0050}$	$\phi28_{-0.0125}^{-0.0100}$		
Ⅳ	绿	$\phi28_{-0.0100}^{-0.0075}$	$\phi28_{-0.0150}^{-0.0125}$		

采用分组装配时，关键要保证分组后各对应组的配合性质和配合公差满足设计要求，所以应注意以下几点：

1）配合件的公差应当相等；

2）公差要向同方向增大，增大的倍数应等于分组数；

3）分组数不宜多，多了会增加零件的测量和分组工作量，从而使装配成本提高。

分组装配法的特点是可降低对组成环的加工要求，而不降低装配精度。但是分组装配法增加了测量、分组和配套工作，当组成环较多时，这种工作就会变的非常复杂。所以分组装配法适用于成批、大量生产中封闭环工厂要求很严、尺寸链组成环很少的装配尺寸链中。例如，精密偶件的装配、滚动轴承的装配等。

3. 修配法

在装配精度要求较高而组成环较多的部件中，若按互换法装配，会使零件精度太高而无法加工，这时常常采用修配装配法达到封闭环公差要求。修配法就是将装配尺寸链中各组成环按经济精度加工，装配后产生的累积误差用修配某一组成环来解决，从而保证其装配精度。

（1）修配方法

1）单件修配法。这种方法是在多环尺寸链中，选定某一固定的零件作为修配环，装配

时进行修配以达到装配精度。

2）合并加工修配法。这种方法是将两个或多个零件合并在一起当作一个修配环进行修配加工。合并加工的尺寸可看作一个组成环，这样减少尺寸链的环数，有利于减少修配量。例如，普通车床的尾座装配，为了减少总装时尾座对底板的刮研量，一般先把尾座和底板的配合平面加工好，并配刮横向小导轨，然后再将两者装配为一体，以底板的底面为定位基准，镗尾座的套筒孔，直接控制尾座套筒孔至底板底面的尺寸，这样一来组成环合 A_2，A_3（见图 7-12）并成一环 $A_{2,3}$，使加工精度容易保证，而且可以给底板底面留较小的刮研量（0.2mm 左右）。

3）自身加工修配法。在机床制造中，有些装配精度要求较高，若单纯依靠限制各零件的加工误差来保证，势必要求各零件有很高的加工精度，甚至无法加工，而且不易选择适当的修配件。此时，在机床的总装时，用机床本身来加工自己的方法来保证机床的装配精度，这种修配法称为自身加工法。例如，在牛头刨床总装后，用自刨的方法加工工作台面，这样就可以较容易的保证滑枕运动方向与工作台面的平行度要求。

（2）修配环的选择和确定其尺寸及极限偏差

采用修配装配法，关键是正确选择修配环和确定其尺寸及极限偏差。

1）修配环选择。选择修配环应满足以下要求：

a. 要便于拆装、易于修配。一般应选形状比较简单、修配面较小的零件。

尽量不选公共组成环。因为公共组成环难于同时满足几个装配要求，所以应选只与一项装配精度有关的环。

b. 确定修配环尺寸及极限偏差。确定修配环尺寸及极限偏差的出发点是，要保证装配时的修配量足够和最小。为此，首先要了解修配环被修配时，对封闭环的影响是逐渐增大还是逐渐减小，不同的影响有不同的计算方法。

为了保证修配量足够和最小，放大组成环公差后实际封闭环的公差带和设计要求封闭环的公差带之间的对应关系如图 7-17 所示，图中 T_0，A_{0max}和 A_{0min}表示设计要求的封闭环公差、最大极限尺寸和最小极限尺寸；T_0'，A_{0max}'和 A_{0min}'分别表示放大组成环公差后实际封闭环的公差、最大极限尺寸和最小极限尺寸；C_{max}表示最大修配量。

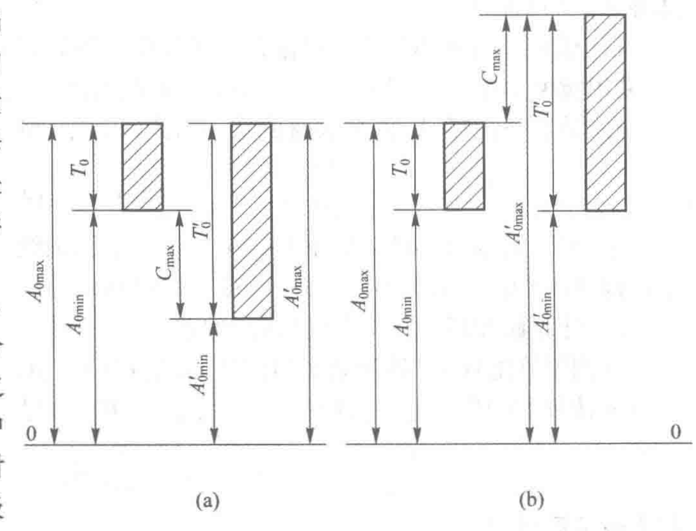


图 7-17　封闭环公差带要求值和实际公差带的相对关系

（a）越修越大时；（b）越修越小时

修配环被修配使封闭环尺寸变大，简称“越修越大”。由图 7-17（a）可知无论怎样修配总应满足

$$A_{0max}' = A_{0max} \tag{7.5}$$

若 $A_{0max}' > A_{0max}$，修配环被修配后 A_{0max}'会更大，不能满足设计要求。

修配环被修配使封闭环尺寸变小，简称“越修越小”。由图 7-16（b）可知，为保证修配量足够和最小，应满足

$$A'_{0\min}=A_{0\min} \tag{7.6}$$

当已知各组成环放大后的公差，并按“入体原则”确定组成环的极限偏差后，就可按式（7.5）或式（7.6）求出修配环的某一极限尺寸，再由已知的修配环公差求出修配环的另一极限尺寸。

按照上述方法确定的修配环尺寸装配时出现的最大修配量为

$$C_{\max}=T'_0-T_0=\sum_{i=1}^{m+n}T_i-T_0 \tag{7.7}$$

2）尺寸链的计算步骤和方法。下面举例说明采用修配装配法时尺寸链的计算步骤和方法。

例如图 7-15（a）所示普通车床床头和尾座两顶尖等高度要求为 0～0.06（只许尾座高）。设各组成环的基本尺寸 $A_1=202$ mm，$A_2=46$ mm，$A_3=156$ mm，封闭环 $A_0=0^{+0.06}_{0}$ mm。此装配尺寸链如采用完全互换法解算，则各组成环公差平均值为

$$T_M=\frac{T_0}{m+n}=\frac{0.06}{2+1}\text{mm}=0.02\text{mm}$$

如此小的公差给加工带来困难，不宜采用完全互换法，现采用修配装配法。

解　计算步骤和方法如下：

a. 选择修配环。因组成环 A_2 尾座底板的形状简单，表面面积小，便于刮研修配，故选择 A_2 为修配环。

b. 确定各组成环公差。根据各组成环所采用的加工方法的经济精度确定其公差。A_1 和 A_3 采用镗模加工，取 $T_1=T_3=0.1$mm；底板采用半精刨加工，取 $T_2=0.15$ mm。

c. 计算修配环 A_2 的最大修配量。由式（7.7）得

$$C_{\max}=T'_0-T_0=\sum_{i=1}^{m+n}T_i-T_0=(0.1+0.15+0.1-0.06)\text{mm}=0.29\text{mm}$$

d. 确定各组成环的极限偏差。A_1 与 A_3 是孔轴线和底面的位置尺寸，故偏差按对称分布，即 $A_1=202\pm0.05$mm，$A_3=156\pm0.05$mm。

e. 计算修配环 A_2 的尺寸及极限偏差。

• 判别修配环 A_2 修配时对封闭环 A_0 的影响。由图 7-15 可知，是“越修越小”的情况。

• 计算修配环尺寸及极限偏差。由式（7.6）可得

$$A'_{0\min}=A_{0\min}=\sum_{i=1}^{m}\vec{A}_{i\min}-\sum_{i=1}^{n}\overleftarrow{A}_{i\max}$$

代入数值后可得

$$A_{2\min}=A_{0\min}-A_{3\min}+A_{1\max}=[0-(156-0.05)+(202+0.05)]\text{mm}=46.1\text{mm}$$

又

$$T_2=0.15\text{mm}$$

则

$$A_{2\max}=A_{2\min}+T_2=46.25\text{mm}$$

所以

$$A_2=46^{+0.25}_{+0.10}\text{mm}$$

在实际生产中，为提高接触 A_2 精度还应考虑底板、底面在总装时必须留一定的刮研量。而按式（7.6）求出的 A_2，其最大刮研量为 0.29mm，符合要求，但最小刮研量为 0 时

就不符合要求，故必须将 A_2 加大。对底板而言，最小刮研量可留 0.1mm，故 A_2 应加大 0.1mm，即 $A_2 = 46^{+0.35}_{+0.20}$ mm。

3）修配法的特点及应用场合。修配法可降低对组成环的加工要求，利用修配组成环的方法获得较高的装配精度，尤其是尺寸链中环数较多时，其优点更为明显。但是，修配工作需要技术熟练的工人，有大多是手工操作，逐个修配，所以生产率低，没有一定节拍，不易组织流水装配，产品没有互换性。因而，在大批大量生产中很少采用，在单件小批生产中广泛采用修配法；在中批生产中，一些封闭环要求较严的多环装配尺寸链大多采用修配法。

4. 调整法

调整法是将尺寸链中各组成环按经济精度加工，装配时将尺寸链中某一预先选定的环，采用调整的方法改变其实际尺寸或位置，以达到装配精度要求。预先选定的环称为调整环（或补偿环），它是用来补偿其他各组成环由于公差放大后所产生的累计误差。调整法通常采用极值法计算。根据调整方法的不同，调整法分为：固定调整法、可动调整法和误差抵消调整法三种。

调整法和修配法在补偿原则上是相似的，而方法上有所不同。

在尺寸链中选定一组成环为调整环，该环按一定尺寸分级制造，装配时根据实测累积误差来选定合适尺寸的调整零件（常为垫圈或轴套）来保证装配精度，这种方法称为固定调整法。该法主要问题是确定调整环的分组数及尺寸，现举例说明。

图 7-18（a）所示为齿轮在轴上的装配关系。要求保证轴向间隙为 0.05～0.2mm，即 $A_0 = 0^{+0.2}_{+0.05}$ mm，已知 A_1＝115mm，A_2＝8.5mm，A_3＝95mm，A_4＝2.5mm。画出尺寸链图如图 7.8（b）所示。若采用完全互换法，则各组成环的平均公差应为

$$T_M = \frac{T_0}{m+n} = \frac{0.2-0.005}{5} = 0.003\text{mm}$$

显然，因组成环的平均公差太小，加工困难，不宜采用完全互换法，现采用固定调整法。

组成环 A_k 为垫圈，形状简单，制造容易，装拆也方便，故选择 A_k 为调整环。其他各组成环按经济精度确定公差，即 $T_1 = 0.15$mm，$T_2 = 0.10$mm，$T_3 = 0.10$mm，$T_4 = 0.12$mm。并按“入体原则”确定极限偏差分别为 $A_1 = 115^{+0.20}_{+0.05}$ mm，$A_2 = 8.5^{\ 0}_{-0.10}$ mm，$A_3 = 9.5^{\ 0}_{-0.10}$mm，$A_4 = 2.5^{\ 0}_{-0.12}$mm。四个环装配后的累积误差（不包括调整环）为

$$T_s = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 = 0.15 + 0.1 + 0.1 + 0.12 = 0.47\text{mm}$$

为满足装配精度 T_0＝0.15mm，应将调整环 A_k 的尺寸分成若干级，根据装配后的实际间隙大小选择装入，即间隙大的装上厚一些的垫圈，间隙小的装上薄一些的垫圈。如调整环 A_k 做得绝对准确，则应将调整环分成 $\frac{T_s}{T_0}$ 级，实际上调整环 A_k 本身也有制造误差，故也应给出一定的公差，这里设 T_k＝0.03mm。这样调整环的补偿能力有所降低，此时分级数 m 为

$$m = \frac{T_s}{T_0 - T_k} = \frac{0.47}{0.15-0.03} = 3.9$$

m 应为整数，取 m＝4。此外分级数不宜过多，否则使调整件的制造和装配均造成麻烦。求得每级的级差为

$$T_0 - T_k = 0.15 - 0.03 = 0.12\text{ mm}$$

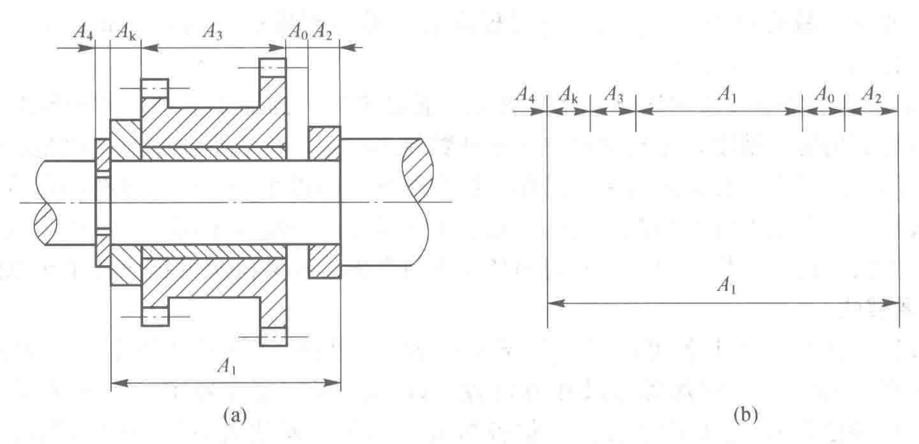


图 7-18 固定调整法装配图示例

设 A_{k1} 为调整后最大调整件尺寸，则各调整件尺寸计算如下：

因为
$$A_{0\max} = A_{1\max} - (A_{2\min} + A_{3\min} + A_{4\min} + A_{k\min})$$

所以
$$A_{k1\min} = A_{1\max} - A_{2\min} - A_{3\min} - A_{4\min} - A_{0\max} = 115.2 - 8.4 - 94.9 - 2.38 - 0.2 = 9.32\text{mm}$$

已知 T_k=0.03mm，级差为 0.12mm，偏差按“入体原则”分布，则四组调整垫圈尺寸分别为

$$A_{k1} = 9.35_{-0.03}^{\ 0}\text{mm};\ A_{k2} = 9.23_{-0.03}^{\ 0}\text{mm}$$
$$A_{k3} = 9.11_{-0.03}^{\ 0}\text{mm};\ A_{k4} = 8.99_{-0.03}^{\ 0}\text{mm}$$

调整法的特点是可降低对组成环的加工要求，装配比较方便，可以获得较高的装配精度，所以应用比较广泛。但是固定调整法要预先制作许多不同尺寸的调整件并将它们分组，这给装配工作带来一些麻烦，所以一般多用于大批大量生产和中批生产，而且封闭环要求较严的多环尺寸链中。

7.4.3 装配方法的选择

装配方法各有特点。其中有些方法对组成环的加工要求不严，但装配时就要较严格；相反，有些方法对组成环的加工要求较严，而在装配时就比较方便简单。选择装配方法的出发点是使产品制造过程达到最佳效果。具体考虑的因素有：装配精度、结构特点（组成环环数等)、生产类型及具体生产条件。

一般来说，当组成环的加工比较经济可行时，就要优先采用完全互换装配法。成批生产、组成环又较多时，可考虑采用大数互换法。

当封闭环公差要求较严时，采用互换装配法会使组成环加工比较困难或不经济时，就采用其他方法。大量生产时，环数少的尺寸链采用选择装配法；环数多的尺寸链采用调整法。单件小批生产时，则常用修配法。成批生产时可灵活应用调整法、修配法和选配法。

一种产品究竟采用何种装配方法来保证装配精度，通常在设计阶段即应确定。这是因为只有在装配方法确定后，才能通过尺寸链的解算，合理地确定各个零、部件在加工和装配中的技术要求。但是，同一种产品的同一装配精度要求，在不同的生产类型和生产条件下，可能采用不同的装配方法。例如，在大量生产时采用完全互换法或调整法保证的装配精度，在

小批生产时可用修配法。因此，工艺人员特别是主管产品的工艺人员必须掌握各种装配方法的特点及其装配尺寸链的解算方法，以便在制订产品的装配工艺规程和确定装配工序的具体内容时，或在现场解决装配质量问题时，根据工艺条件审查或确定装配方法。

7.5 装配工艺规程的制定

装配工艺规程是指导装配生产的主要技术文件，制定装配工艺规程是生产技术准备工作的主要内容之一。

装配工艺规程对保证装配质量、提高装配生产效率、缩短装配周期、减轻工人劳动强度、缩小装配占地面积、降低生产成本等都有重要的影响。它取决于装配工艺规程制定的合理性，这就是制定装配工艺规程的目的。制订装配工艺规程与制定机械加工工艺规程一样，也需要考虑多方面的问题。

装配工艺规程的主要内容是：

1）分析产品图样，划分装配单元，确定装配方法。

2）拟定装配顺序，划分装配工序。

3）计算装配工时定额。

4）确定各工序装配技术要求、质量检查方法和检查工具。

5）确定装配时零、部件的输送方法及所需要的设备和工具。

6）选择和设计装配过程中所需的工具、夹具和专用设备。

7.5.1 装配工艺规程制订的原则

1. 保证产品装配质量，力求提高质量，以延长产品的使用寿命

装配是机器制造过程的最后一个环节。不准确的装配，即使是高质量的零件，也会装出质量不高的机器。像清洗、去毛刺等辅助工作，看来无关大局，但减少了这些工序也会危机整个产品。准确细致地按规范进行装配，就能达到预定的质量要求，并且还可以争取得到较大的精度储备，以延长机器使用寿命。

2. 尽可能缩短装配周期，提高装配效率

最终装配与产品出厂仅一步之差，装配周期拖长，必然阻滞产品出厂，造成半成品的堆积及资金的积压。缩短装配周期对加快工厂资金周转、产品占领市场十分重要。

3. 尽量减少钳工工作，努力降低手工劳工劳动的比例

钳工装配效率低，工作强度大，应合理安排作业计划与装配顺序，采用机械化、自动化手段进行装配等。

4. 尽量减少装配占地面积，提高单位面积的生产率

在大量生产的汽车工厂中，组织部件、组件平行装配，总装在流水线上按严格的节拍进行，装配效率高，车间布置紧凑。

5. 合理安排装配工艺过程的顺序和工序

无论装配什么产品，都应首先确定一个基准件先进入装配线，然后再按先下后上，先内后外，先难后易、先重大后轻小，先精密后一般等原则，使零件或装配单元依次进入装配；

还应重视零件或装配单元装配前的准备工作，如清洗、去毛刺、防止碰伤拉毛、防止基准变形等。此外，对装配中、装配后的检验工作也不可忽视，以便及时发现问题，减少返工。

7.5.2 制定装配工艺时所需的原始资料

在制定装配工艺规程前，需要具备以下原始资料。

1. 产品的装配图及验收技术标准

产品的装配图应包括总装图和部件装配图，并能清楚地表示出：所有零件相互连接的结构视图和必要的剖视图，零件的编号，装配时应保证的尺寸，配合件的配合性质及精度等级，装配的技术要求，零件的明细表等。为了在装配时对某些零件进行补充机械加工和核算装配尺寸链，有时还需要某些零件图。

产品的验收技术条件，检验内容和方法也是制定装配工艺规程的重要依据。

2. 产品的生产纲领

产品的生产纲领就是其年生产量。生产纲领决定了产品的生产类型。生产类型不同，致使装配的生产组织形式、工艺方法、工艺过程的划分、工艺装备的多少、手工劳动的比例均有很大不同。

大批大量生产的产品应尽量选择专用的装配设备和工具，采用流水装配方法。现代装配生产中则大量采用机器人，组成自动装配线。对于成批生产、单件小批生产，则多采用固定装配方式，手工操作比重大。在现代柔性装配系统中，已开始采用机器人装配单件小批产品。

3. 生产条件

如果是在现有条件来制定装配工艺规程时，应了解现有工厂的装配工艺设备、工人技术水平、装配车间面积等。如果是新建厂，则应适当选择先进的装备和工艺方法。

7.5.3 制定装配工艺规程的方法与步骤

根据装配工艺规程制定原则和原始资料，可以按下列步骤制定装配工艺规程。

1. 进行产品分析

产品的装配工艺必须满足设计要求，工艺人员应对产品进行分析，必要时会同设计人员共同进行。

1）分析产品图样，即所谓读图阶段，通过读图，熟悉装配的技术要求和验收标准。

2）对产品的结构进行尺寸分析和工艺分析。所谓尺寸分析，是指进行装配尺寸链的分析和计算。对产品图上装配尺寸链及其精度进行验算，在此基础上，确定保证装配精度的装配工艺方法并进行必要的计算。工艺分析就是对产品装配结构的工艺性进行分析，确定产品结构是否便于装配、拆卸和维修，这就是所谓的审图阶段。在审图过程中，如发现属于设计结构上的问题或有更好的改进设计意见，应及时会同设计人员加以解决，必要时对产品图纸进行工艺会签。

3）研究产品分解成“装配单元”的方案，以便组织平行、流水作业。

2. 装配方法

这里所指的装配方法包含两个方面，一方面是指手工装配还是机械装配；另一方面是指保证装配精度的工艺方法和装配尺寸链的计算，如互换分组法等。对前者的选择，主要取决

于生产纲领和产品的装配工艺性，但也要考虑产品尺寸和质量的大小以及结构的复杂程度；对后者的选择则主要取决于生产纲领和装配精度，但也于装配尺寸链中的环数的多少有关。具体情况见表 7-3。

表 7-3　各种装配方法的适用范围和应用实例

装配方法	适用范围	应用实例
完全互换法	适用于零件数较少、批量大、零件可用精度加工少时	汽车、拖拉机、中小型柴油机、裁缝机及小型电机的部分选择
不完全互换法	适用于零件数稍多、批量大、零件加工精度需适当放宽	机床、仪器仪表中某些部件
分组法	适用于成批或大量生产中，装配精度很高，零件数很少，又不便采用调整装配时	中小型柴油机的活塞与缸套、活塞与活塞销、滚动轴承的内外圈与滚珠
修配法	单件小批量生产中，装配精度要求高且零件数较多的场合	车床尾座垫板、滚齿机分度蜗轮与工件台装配后精加工齿形、平面磨床砂轮（架）对工作台自磨
调整法	除必须采用分组法选配的精密配件外，调整法可用于各种装配场合	内燃机气门间隙的调整螺钉，滚动轴承调整间隙的间隙套、垫圈、锥齿轮调整间隙的垫片

3. 装配组织形式

装配组织形式的选择，主要取决于产品的结构特点（包括尺寸、重量和复杂程度）、生产纲领和现有生产条件。装配组织形式按产品在装配过程中是否移动分为固定式和移动式两种。

（1）固定式装配

固定式装配即将产品或部件的全部装配工作在一个固定的地点进行，在装配过程中产品位置不变，装配所需要的零部件都汇集在工作地点。

固定式装配的特点是装配周期较长，效率较低，对工人的技术要求也较高。一般用于单件小批生产的产品、机床等装配精度要求很高的产品、重型而不便移动的产品的装配。如机床、汽轮机的装配。

（2）移动式装配

移动式装配是装配工人和工作地点固定不变而将产品或部件置于装配线上，通过连续或间隔地移动使其顺次经过各装配工作地，以完成全部装配工作。采用移动式装配时，装配过程分的很细，每个工人重复完成固定工作。

在装配流水线上进行的，装配时产品在装配线上移动，有连续移动式装配和断续移动式装配两种：连续移动装配时，装配线每隔一定时间往前移动一步，将装配对象带到下一工位。这种方法装配效率高，周期短，对工人的技术要求较低，但对每一工位的装配时间有严格要求，常用于大批大量生产装配流水线和自动线。

移动式装配常用于大批量生产时组成流水作业线或自动线，如汽车、拖拉机、仪器仪表等产品的装配。

4. 划分装配单元，确定装配顺序

（1）划分装配单元

将产品划分为可进行独立装配的单元是制订装配工艺规程中最重要的一个步骤，这对于大批大量生产结构复杂的产品尤为重要。只有划分好装配单元，才能合理安排装配顺序和划分装配工序，组织平行流水作业。

产品或机器是由零件、合件、组件部件等装配单元组成。零件是组成机器的最基本单元。若干零件永久连接或连接后再加工便成为一个合件，如镶了衬套的连杆、焊接成的支架等。若干零件或与合件组合在一起成为一个组件，它没有独立完整的功能，如主轴和装在其上的齿轮、轴、套等构成主轴组件。若干组件、合件和零件装配在一起，成为一个具有独立、完整功能的装配单元，称为部件。如车床的主轴箱、溜板箱、进给箱等。

（2）选择装配基准件

上述各装配单元都要首先选择某一零件或低一级的单元作为装配基准件。基准件应当体积（或质量）较大，有足够的支承面以保证装配时的稳定性。如主轴是主轴组件的装配基准件，主轴箱体是主轴箱部件的装配基准件，床身部件又是整台机床的装配基准件等。

（3）确定装配顺序的原则

划分好装配单元并选定装配基准件后，就可安排装配顺序。确定装配顺序的要求是保证装配精度，以及使装配联结调整、校正和检验工作能顺利进行，前面工序不防碍后面工序进行，后面工序不应损坏前面工序的质量，一般安排装配顺序的原则如下：

1）预处理工序先行，如倒角、去毛刺与飞边、清洗、涂漆等。

2）先下后上，先内后外，先难后易，先重大后轻小，先精密后一般，以保证装配顺利进行。

3）位于基准件同一方位的装配工作和使用同一工艺装备的工作尽量集中进行。

4）易燃、易爆等有危险性的工作，尽量放在最后进行。

为了清晰表示装配顺序，常用装配单元系统图来表示产品零部件相互装配关系及装配流程。例如，图 7-19（a）所示是产品的装配系统图；图 7-19（b）所示是部件的装配系统图。图 7-20 所示是车床床身部件图，图 7-21 所示是它的装配工艺系统图。

（4）装配单元系统的画法

1）画装配单元系统图时，先画一条较粗的横线，横线的右端箭头指向装配单元的长方格，横线左端为基准件的长方格。

2）按装配先后顺序，从左向右依次将装入基准件的零件、合件、组件和部件引入。表示零件的长方格画在横线上方；表示合件、组件和部件的长方格画在横线下方。每一长方格内，上方注明装配单元名称，左下方填写装配单元的编号，右下方填写装配单元的件数。

3）在适当的位置加注必要的工艺说明（如焊接、配刮、配钻、攻螺纹等）。

装配单元系统图比较清楚而全面地反应了装配单元的划分、装配顺序和装配工艺方法。它是装配工艺规程制定中的主要文件之一，也是划分装配工序的依据。

5. 装配工序的划分与设计

装配顺序确定以后，就可以将工艺过程划分若干工序，并进行具体装配工序的设计。工序的划分主要是确定工序集中与工序分散的程度，并根据产品的结构和装配精度的要求确定各装配工序的具体内同。工序的划分通常和工序设计一起进行。

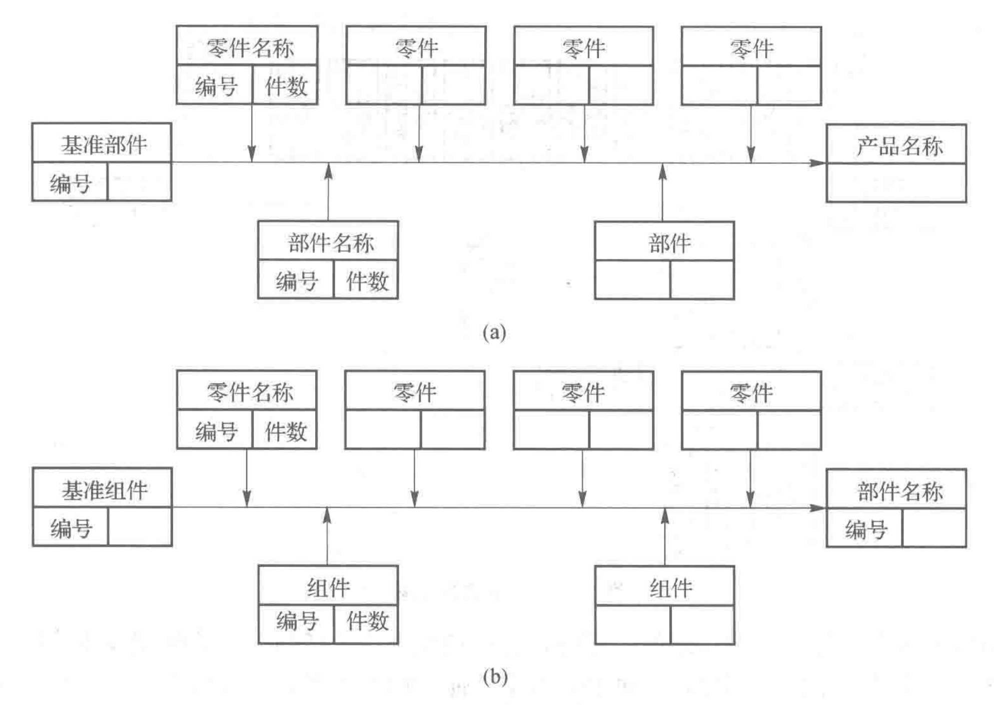


图 7-19　装配系统图

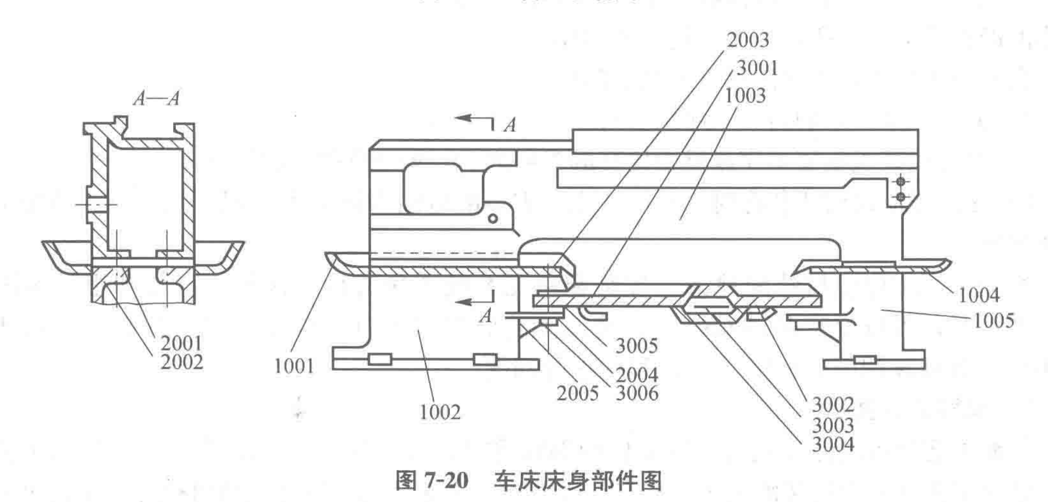


图 7-20　车床床身部件图

工序设计的主要内容如下：

1）必须选择合适的装配方法，制定工序的操作规范。例如，过盈配合所需压力、变温装配的温度值、紧固螺栓连接的预紧扭矩、装配环境等。

2）选择设备和工艺装备。例如选择装配工作所需的设备、工具、夹具和量具等。若需要专用设备与工艺设备，则提出设计任务书。

3）确定工时定额，并协调各工序内容。目前装配的工时定额都是根据实践经验估计。在大批大量生产时，要严格测算平衡工序的节拍，均衡生产，实现流水作业。

装配工艺过程是由站、工序、工步和操作组成的。站是装配工艺过程的一部分，是指在一个装配地点，有一个（或一组）工人所完成的那部分装配工作，每一个站可以包括一个工

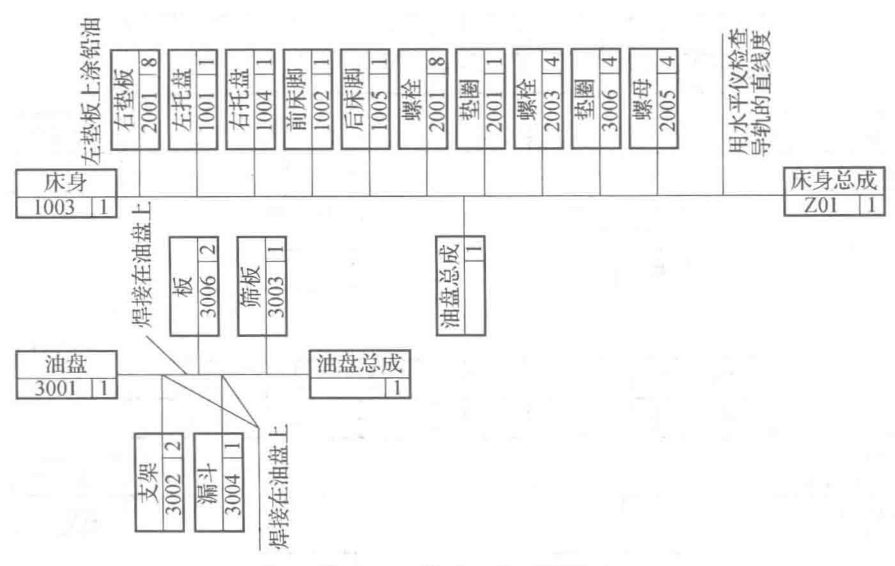


图 7-21　装配工艺系统图

序也可以是多个工序，工序是站的一部分，它包括在产品的任何一部分所完成组装的一切连续工作。工步是工序的一部分，在每个公布中，使所用的工具及组合件不变，但根据生产规模的不同，每个工步还可以按技术条件分得更加详细一些。操作时指在工步进行过程中（或工步的准备工作中）所做的各个简单的动作。

在安排工序时，必须注意下面几个问题：

1）前一工序不影响后一工序的进行；

2）在完成某些重要工序或易出废品的工序之后，均应安排检查工序；

3）在采用流水线式装配时，每一工序所需要的时间应该等于装配节拍（或为装配节拍的整数倍）。

划分装配工序应按装配单元应按装配单元系统图来进行，首先由合件和组件装配开始，然后是部件以至产品的总装配。装配工艺流程图可以在该过程中一并拟制，与此同时还应考虑到该期间的运输、停放和储存等问题。

6. 编写工艺文件

装配工艺规程设计完成后，以文件的形式将其内容固定下来的文件，称为装配工艺规程。装配工艺规程中的装配工艺过程卡片和装配工序卡片的编写方法与机械加工工艺过程卡片和工序卡片基本相同。

单件小批生产时，通常只绘制装配单元系统图。成批生产时，除装配单元系统图外还编制装配工艺卡，在其上写明工序次序、工序内容、设备和工装名称、工人技术等级和时间定额等。大批大量生产中，不仅要编制装配工艺卡，而且要编制装配工序卡，以便直接指导工人进行装配。

7. 制定产品检测与实验规范

产品装配完毕后，应按产品的要求指定检测与实验规范，其内容如下：

1）检测和实验的项目及检验质量指标

2）检测和实验的方法、条件与环境要求。

3）检测和实验所需工装的选择和设计。

7.6　项目实施

1. 任务分析

7.1中的任务是编制滚动轴承自动装配的工艺规程。滚动轴承一般采用分组装配法，轴承内、外套圈在检测工位进行内、外径测量后，送入选配合套工位，合套后的内、外圈一同送到装球机装入钢球和保持架，然后在点焊工位把保持架焊好，再通过退磁、清洗、外观检测，最后涂油包装送出。

2. 实施过程

根据制定装配工艺规程的方法和步骤，向心球轴承的装配工艺流程如图7-22所示。

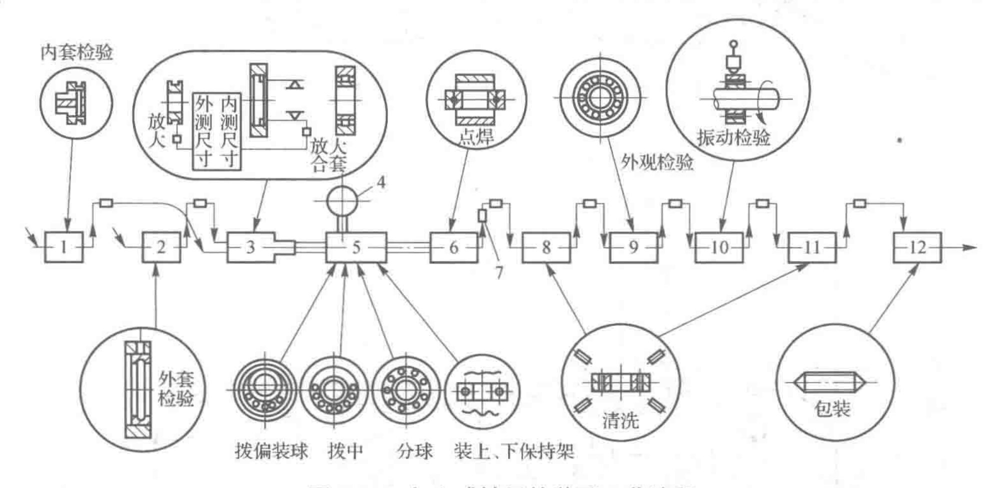


图7-22　向心球轴承的装配工艺流程

1—内套检验；2—外套检验；3—选配合套；4—钢球料仓；5—装球；6—点焊保持架；7—退磁；8—外观检验；10—振动检验；11—包装

7.7　拓展项目

1. 任务案例

如图7-23所示为减速器装配图。

2. 任务要求

试编制其装配工艺规程。

3. 任务实施

减速机的装配设计是按减速机的装配顺序进行的，先实现部件的装配，然后再由部件装配称为减速机。生产实际中将减速机分为大小齿轮部件、小齿轮部件、箱座和箱盖。先进行大、小齿轮部件的装配，然后再将大、小齿轮部件装配到箱座上，最后进行整体的装配。下面介绍主要的装配步骤。

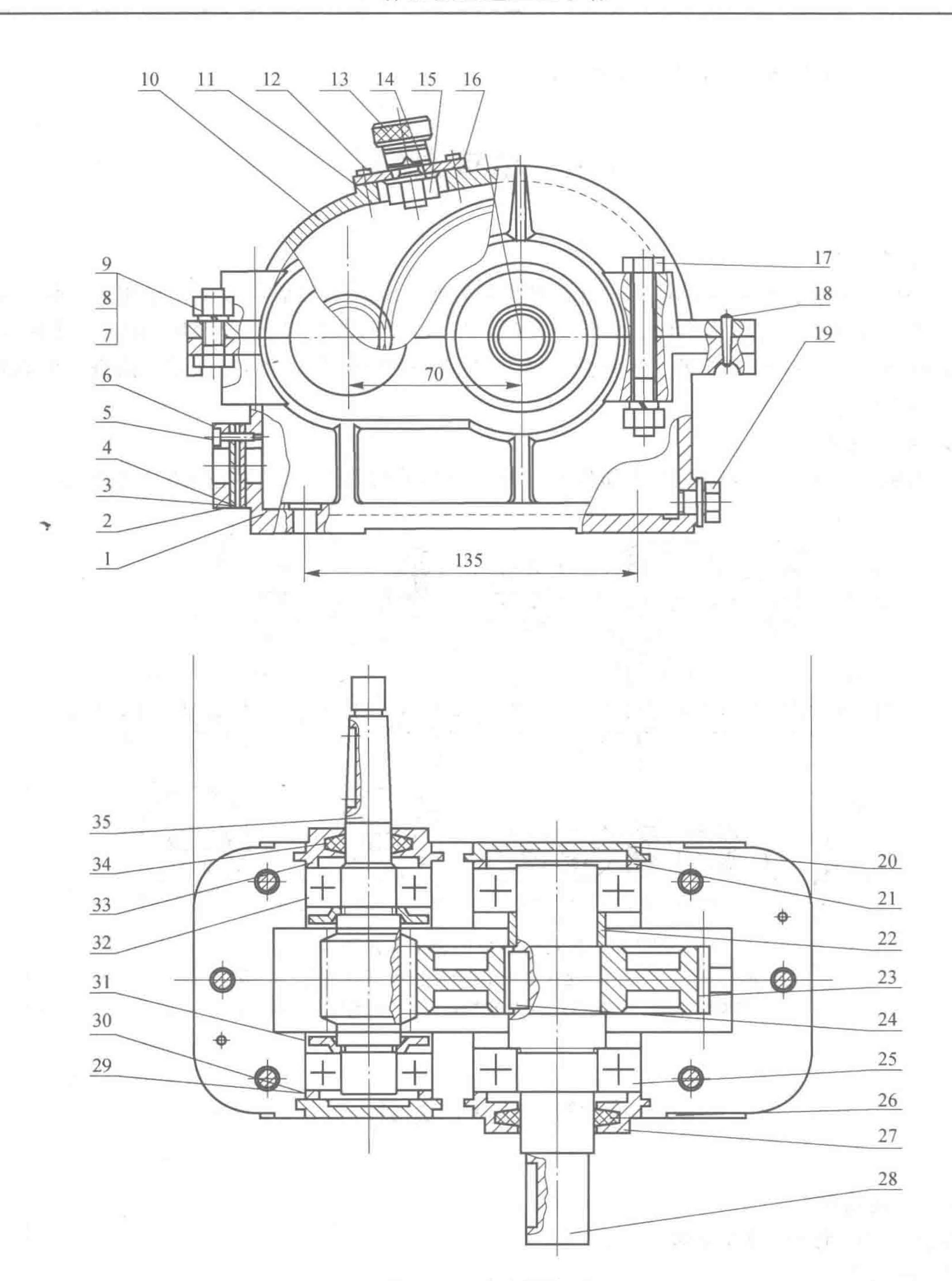


图 7-23　减速器装配图

1—箱体；2—毡圈；3—发光片；4—油面指示片；5—螺钉；6—小盖；7—螺栓；8—垫圈；9—螺母；10—箱盖；11—垫片；12—螺钉；13—通气塞；14—垫圈；15—螺母；16—盖；17—螺栓；18—销；19—螺塞；20—端盖；21—调整环；22—套筒；23—齿轮；24—键；25—滚动轴承；26—毡圈；27—端盖；28—从动轴；29—端盖；30—调整环；31—挡油环；32—滚动轴承；33—端盖；34—毡圈；35—主动齿轮轴

1）大齿轮部件的装配。先将键装到轴上，然后根据大齿轮装到轴。再依次将定矩环和轴承装好。保证键槽与键在宽度向上对齐，大齿轮轮毂端面与轴肩端面贴合，齿轮与轴的中心线对齐。

2）小齿轮部件的装配。将轴承装在小齿轮轴的两个轴端即可。

3）箱座部件的装配。先将大、小齿轮部件装配到箱座上，大齿轮组件的轴线与箱座轴承孔的轴线对齐，完成箱座与大齿轮部件的装配。然后将螺塞及油尺组件装配到箱座上，完成箱座的附件装配。

4）箱盖的装配。使箱座与箱盖的凸缘装配面贴合、箱座与箱盖的大轴承孔的中心线对齐、箱座与箱盖的定位销孔中心线对齐，依次将定位销、螺栓装好。

5）轴承端盖的组装。保证轴承端盖的凸缘内端面与箱体上的轴承座端面贴合、两者的中线重合；螺钉螺纹中心与螺纹孔对齐、螺钉端面与轴承盖端面贴合。

6）观察孔盖及通气器的组装。依次将观察孔盖、通气器装到减速机箱盖上。

习题

1. 什么是装配单元？为什么要把机器划分成许多独立装配单元？

2. 装配工作基本内容有哪些？

3. 装配工艺规程包括哪些主要内容？是经过哪些步骤制定的？

4. 装配精度一般包括哪些内容？装配精度与零件的加工精度有什么关系？

5. 装配尺寸链是如何构成的？

6. 查找装配尺寸链应该注意哪些事项？

7. 保证装配精度的方法有哪些？如何选择装配方法？

8. 装配顺序安排原则有哪些？

9. 说明装配尺寸链中的组成环、封闭环、协调环、补偿环和公共环的含义及其特点。

10. 设有一轴、孔配合，若轴的尺寸为 $\phi 80_{-0.10}^{\ 0}$ mm，孔的尺寸为 $\phi 80_{\ 0}^{+0.20}$ mm，试用完全互换法和大数互换法装配，并分别计算其封闭环公称尺寸、公差和分布位置。

11. 现有一活塞部件，其各组成零件有关尺寸如图 7-24 所示，试分别按极值公差公式和统计公差公式计算活塞行程的极限尺寸。

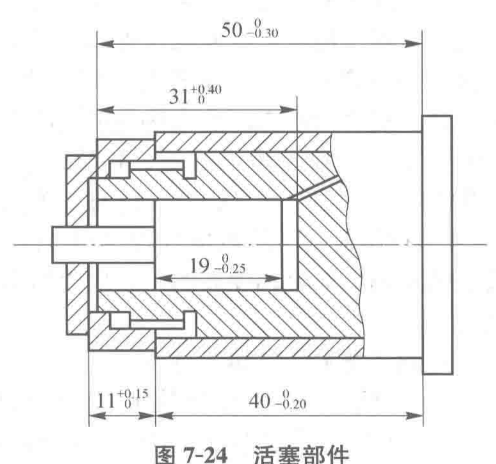


图 7-24　活塞部件

项目八　先进制造技术

【知识点】

- 先进制造技术概论；
- 传统机械制造技术与先进制造技术的区别；
- 先进制造技术的发展趋势；
- 计算机辅助和综合自动化技术；
- 柔性制造系统；
- 计算机集成制造系统；
- 典型先进制造技术的加工方法、基本原理和设备。

【技能点】

- 能够比较各种先进制造技术之间的联系与区别；
- 掌握1～2种特种加工技术进行比较；
- 能够应用先进的生产管理技术进行工厂实践分析；
- 能够应用先进的制造模式进行工艺分析。

8.1　概述

8.1.1　先进制造技术的内涵和特点

先进制造技术（Advanced Manufacturing Technology，AMT）是在传统制造技术基础上不断吸收机械、电子、信息、材料、能源，以及现代管理技术的成果，将其综合应用于产品设计、加工装配、检验测试、经营管理、售后服务乃至回收的制造全过程，以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产，提高对动态多变市场的适应能力和竞争能力的制造技术的总称。其内容包括了工程设计、加工制造、生产管理、物流及贮存等新技术，如数控技术(NC)、计算机集成技术（CIMS)、并行工程（CE)、精益生产（LP)、敏捷制造（AM)、智能制造（IMS)、仿真技术和虚拟制造、产品数据管理（PDM）等。先进制造技术是在计算机技术和管理技术飞速发展的推动下诞生和发展的，它促使制造业在产品结构、生产模式和生产过程发生了巨大的变化。

与传统制造技术比较，先进制造技术具有如下特点：

1）系统性。由于计算机技术、信息技术、传感技术、自动化技术和先进管理技术等的引入，并与传统制造技术的结合，使先进制造技术成为一个能够驾驭生产过程中的物质流、

信息流和能量流的系统工程；而传统制造技术一般只能驾驭生产过程中的物质流和能量流。

2）广泛性。传统制造技术通常只是指将原材料变为成品的各种加工工艺；而先进制造技术则贯穿了从产品设计、加工制造到产品销售及使用维护的整个过程，成为“市场—设计开发—加工制造—市场”的大系统。

3）集成性。传统制造技术的学科专业单一、独立，相互间界限分明，而先进制造技术由于专业和学科间的不断渗透、交叉、融合，其界限逐渐淡化甚至消失，技术趋于系统化、集成化，已发展成为集机械、电子、信息、材料和管理技术为一体的新型交叉学科——制造系统工程。

4）动态性。先进制造技术是在针对一定的应用目标，不断吸收各种高新技术逐渐形成和发展起来的新技术，因而其内涵不是绝对的和一成不变的。反映在不同的时期、不同的国家和地区，先进制造技术有其自身不同的特点、重点、目标和内容。

5）实用性。先进制造技术的发展是针对某一具体的制造需求而发展起来的先进、实用的技术，有着明确的需求导向。先进制造技术不是以追求技术的高新度为目的，而是注重产生最好的实践效果，以促进国家经济的快速增长和提高企业综合竞争力。

8.1.2　先进制造技术的体系结构

先进制造技术所涉及的学科门类繁多，包含的技术内容广泛。在不同的国家、不同的发展阶段，先进制造技术具有不同的内容和体系。1994 年美国联邦科学、工程和技术协调委员会（FCCSET）下属的工业和技术委员会先进制造技术工作组提出将先进制造技术分为主体技术群、支撑技术群、制造技术环境三个技术群。此三个技术群相互联系、相互促进，组成一个完整的体系，每个部分均不可缺少，否则就很难发挥预期的整体功能效益。先进制造技术的体系结构见表 8-1。

表 8-1　先进制造技术的体系结构

主体技术群		面向制造的设计技术群	制造工艺技术群
支撑技术群	制造技术环境		
（1）产品、工艺设计； ①计算机辅助设计； ②工艺过程建模和仿真； ③工艺规程设计； ④系统工程设计 ⑤工作环境设计 （2）快速成型技术； （3）并行工程	（1）材料生产工艺； （2）加工工艺； （3）连接和装配； （4）测试和检验； （5）环保技术； （6）维修技术； （7）其他	（1）信息技术； ①接口和通信； ②数据库； ③集成框架； ④软件工程； ⑤人工智能； ⑥决策支持。 （2）标准和框架； ①数据标准； ②产品定义标准； ③工艺标准； ④检验标准； ⑤接口框架 （3）机床和工具技术； （4）传感器和控制技术	（1）质量管理； （2）用户/供应商交互作用； （3）工作人员培训和教育； （4）全国监督和基准评价； （5）技术获取和利用

8.2 先进制造工艺技术

8.2.1 概述

1. 机械制造工艺的定义和内涵

机械制造工艺是将各种原材料通过改变其形状、尺寸、性能或相对位置，使之成为成品或半成品的方法和过程。机械制造，工艺为本，机械制造工艺是机械制造业的一项重要基础技术。

机械制造工艺流程是由原材料和能源提供、毛坯和零件成形、机械加工、材料改性与处理、装配与包装、质量检测与控制等多个工艺环节组成。按其功能的不同，可将机械制造工艺分为如下 3 个阶段：

1）零件毛坯的成形准备阶段：包括原材料切割、焊接、铸造、锻压加工成形等；

2）机械切削加工阶段：包括车削、钻削、铣削、刨削、镗削、磨削加工等；

3）表面改性处理阶段：包括热处理、电镀、化学镀、热喷涂、喷装等。

在现代机械制造中，上述 3 个阶段的划分逐渐变得模糊、交叉，甚至合而为一，如粉末冶金和注射成形工艺，则将毛坯准备与加工成形过程合而为一，直接由原材料转变为成品的制造工艺。

此外，机械制造工艺还应包括检测和控制工艺环节。然而，检测和控制并不独立地构成工艺过程，它们是附属于各个工艺过程而存在，其目的是提高各个工艺过程的技术水平和质量。

2. 先进制造工艺的定义、产生和发展

随着越来越激烈的市场竞争，制造业的经营战略不断发生变化，生产规模、生产成本、产品质量、市场响应速度相应成为企业的经营目标。为此，要求机械制造工艺必须适应这种变化，促使一种优质、高效、低耗、洁净和灵活的制造工艺的形成。因而，先进制造工艺是在不断变化和发展的传统机械制造基础上逐步形成的一种制造工艺技术，是高新技术产业化和传统工艺高新技术化的结果。先进制造工艺是先进制造技术的核心和基础，一个国家的制造工艺技术水平的高低，在很大程度上决定了其制造业在国际市场的竞争力。

先进制造工艺具有直接的推广价值和广阔的应用前景，是最活跃的前沿研究领域。其发展表现在如下几个方面。

（1）制造加工精度不断提高

随着制造工艺技术的进步与发展，机械制造加工精度得到不断提高。18 世纪，加工第一台蒸汽机所用的汽缸镗床，其加工精度为 1mm；19 世纪末，机械制造精度也仅为 0.05mm；20 世纪初，由于能够测量 0.001mm 千分尺和光学比较仪的问世，使加工精度向微米级过渡，成为机械加工精度发展的转折点；到了 20 世纪 50 年代末，实现了微米级的加工精度；在最近的一二十年时间内，机械制造加工精度提高了 1～2 个数量级，有了较快的发展，达到 10nm 的技术水平。现在测量超大规模集成电路所用的电子探针，其测量精度已达到 0.25nm。预计在不远的将来，可实现原子级的加工和测量。

（2）切削加工速度迅速提高

随着刀具材料的发展和变革，在近一个世纪内，切削加工速度提高了100倍至数百倍。在20世纪前，切削刀具是以碳素钢作为刀具材料，由于其耐热温度低于200℃，所允许的切削速度不超过10m/min；20世纪初，出现了高速钢，其耐热温度为500～600℃，可允许的切削速度为30～40m/min；到了20世纪30年代，硬质合金开始得到使用，刀具的耐热温度达到800～1 000℃，切削速度很快提高到每分钟数百米。随后，相继使用了陶瓷刀具、金刚石刀具和立方氮化硼（CBN）刀具，其耐热温度均在1 000℃以上，切削速度超过1 000m/min。

（3）新型工程材料的应用推动了制造工艺的进步和变革

超硬材料、超塑材料、高分子材料、复合材料、工程陶瓷、非晶与微晶合金、功能材料等新型材料的发展与应用，对制造工艺提出了新的挑战：一方面迫使在通常机械加工工艺方法中要不断改善刀具材料的切削性能，改进机械加工制造设备，使之满足新材料的机械加工要求；另一方面探求应用更多的物理、化学、材料科学的现代知识来开发新型的制造工艺，以便更有效地适应新型工程材料的加工。近几十年来发展了一系列特种加工工艺方法，如电火花加工、电解加工、超声波加工、电子束加工、离子束加工和激光加工等。这些新型的加工工艺的出现，是对机械制造业的一种贡献，也是对传统金属切削加工工艺的一种突破，使机械制造工业出现了新的生机和活力。

（4）自动化和数字化工艺装备的发展提高了机械加工的效率

由于微电子、计算机、自动检测和控制技术与制造工艺装备相结合，使工艺装备实现了从单机到系统、从刚性到柔性、从简单到复杂等不同档次的多种自动化转变，使工艺过程的检测和控制方式及手段发生了质的变化，可以使整个工艺过程和工艺参数得到实时的优化，大大提高了加工制造的效率和质量。

（5）零件毛坯成形向少或无余量方向发展

零件毛坯成形是机械制造的第一道工序，有铸造、锻造、冲裁、焊接和轧制等常用工艺。随着人们对人类生存资源的节省和保护意识的提高，要求零件毛坯成形精度向少或无余量方向发展，使成形的毛坯接近或达到零件的最终形状和尺寸，磨削后即可参与装配。因此，出现了熔模精密铸造、精密锻造、精密冲裁、冷温挤压、精密焊接和精密切割等新工艺。

（6）优质清洁表面工程技术的形成和发展

表面工程技术是通过表面涂覆、表面改性、表面加工及表面的复合处理，以改变零件表面的形态、化学成分和组织结构，获取与基体材料不同性能要求的一项应用技术。虽然人们使用表面技术已有悠久的历史，然而形成一门表面工程独立学科只是近20年的事。近几十年来，出现了如电刷镀、化学镀、物理气相沉积、化学气相沉积、热喷涂、化学热处理、激光表面处理、离子注入等一系列先进表面处理技术。这些新技术的出现对节约原材料、提高新产品性能、延长产品使用寿命、装饰环境、美化生活等方面发挥了巨大的作用。

3. 先进制造工艺的特点

从上述先进制造工艺的内涵和发展可以清晰地看出，先进制造工艺具有优质、高效、低耗、洁净和灵活5个方面的显著特点。

1）优质：以先进制造工艺加工制造出的产品质量高、性能好、尺寸精确、表面光洁、

组织致密、无缺陷杂质、使用性能好、使用寿命和可靠性高。

2）高效：与传统制造工艺相比，先进制造工艺可极大地提高劳动生产率，大大降低了操作者的劳动强度和生产成本。

3）低耗：先进制造工艺可大大节省原材料消耗，降低能源的消耗，提高了对日益枯竭的自然资源的利用率。

4）洁净：应用先进制造工艺可做到零排放或少排放，生产过程不污染环境，符合日益增长的环境保护要求。

5）灵活：能快速地对市场和生产过程的变化以及产品设计内容的更改作出反应，可进行多品种的柔性生产，适应多变的产品消费市场需求。

8.2.2 特种加工技术

1. 概述

特种加工是直接利用电能、化学能、光能等进行加工的方法。特种加工与普通机械加工有本质的不同，它不要求工具材料比工件材料更硬，也不需要在加工过程中施加明显的机械力。它可以解决普通机械加工无法完成的加工工作，适合于加工各种不同材料而且结构复杂的模具零件，是模具制造中一种必不可少的重要加工方法。主要包括电火花加工、电火花线切割加工、电解加工、电铸成形加工、型腔表面研磨、照相腐蚀加工等。特种加工具有下列特点：

1）工具材料的硬度可以大大低于工件材料的硬度。

2）可直接利用电能、电化学能、声能或光能等能量对材料进行加工。

3）加工过程中的机械力不明显，工件很少产生机械变形和热变形，有助于提高工件的加工精度和表面质量。

4）各种加工方法可以有选择地复合成新的工艺方法，使生产效率成倍地增长，加工精度也相应提高。

5）几乎每产生一种新的能源，就有可能产生一种新的特种加工方法。

特种加工方法因具有上述特点而适用于以下场合：

1）解决各种难切削材料的加工问题，如耐热钢、不锈钢、铁合金、淬火钢、硬质合金、陶瓷、宝石、金刚石等以及绪和硅等各种高强度、高硬度、高韧性、高脆性以及高纯度的金属和非金属的加工。

2）解决各种复杂零件表面的加工问题，如各种热锻模、冲裁模和冷拔模的模腔，型孔、整体涡轮、喷气涡轮机叶片、炮管内腔线以及喷油嘴和喷丝头的微小异形孔的加工问题。

3）解决各种精密的、有特殊要求的零件加工问题，如航空航天、国防工业中表面质量和精度要求都很高的陀螺仪、伺服阀以及低刚度的细长轴、薄壁筒和弹性元件等的加工。

特种加工发展至今虽有50多年的历史，但在分类方法上并无明确规定。一般按能量形式和作用原理进行划分。

1）按电能与热能作用方式有电火花成形与穿孔加工（EDM）、电火花线切割加工（WEDM）、电子束加工（EBM）和等离子体加工（PAM）。

2）按电能与化学能作用方式有电解加工（ECM）、电铸加工（ECM）和刷镀加工。

3）按电化学能与机械能作用方式有电解磨削（ECG）、电解珩磨（ECH）。

4）按声能与机械能作用方式有超声波加工（USM）。

5）按光能与热能作用方式有激光加工（LBM）。

6）按电能与机械能作用方式有离子束加工（IM）。

7）按液流能与机械能作用方式有水射流切割（WJC）、磨料水喷射加工（AWJC）和挤压珩磨（AFH）。

在特种加工范围内还有一些属于降低表面粗糙度和改善表面性能的工艺。前者如电解热抛光、化学抛光、离子束抛光等；后者如电火花表面强化、镀覆、电子束曝光、离子束注入渗杂等。

2. 电火花加工

电火花加工的原理是基于工具电极与工件电极（正极与负极）之间脉冲性火花放电时的电腐蚀现象来对工件进行加工，以达到一定形状、尺寸和表面粗糙度要求的加工方法。电火花加工也称放电加工或电蚀加工。当工具电极与工件电极在绝缘液体中靠近时，极间电压将在两极间“相对最靠近点”电离击穿，形成脉冲放电。在放电通道中瞬时产生大量的热能，使金属局部熔化甚至气化，并在放电爆炸力的作用下，把熔化的金属抛出去，达到蚀除金属的目的。

电火花加工是在一定的液体介质中，利用脉冲放电对导电材料的电蚀现象来蚀除材料，从而使零件的尺寸、形状和表面质量达到预定技术要求的一种加工方法。在特种加工中，电火花加工的应用最为广泛，尤其在模具制造业、航空航天等领域有着极为重要的地位。

（1）电火花加工的原理与特点

电火花加工是在如图 8-1 所示的加工系统中进行的。加工时，脉冲电源的一极接工具电极，另一极接工件电极。两极均浸入具有一定绝缘度的液体介质（常用煤油或矿物油或去离子水）中。工具电极由自动进给调节装置控制，以确保工具与工件在正常加工时维持一很小的放电间隙（0.01～0.05mm）。当脉冲电压加到两极之间，便将当时条件下极间最近点的液体介质击穿，形成放电通道。由于通道的截面积很小，放电时间极短，致使能量高度集中（$(0.1\sim1)\times10^7\,W/mm^2$），放电区域产生的瞬时高温足以使材料熔化甚至蒸发，以致形成一个小凹坑。

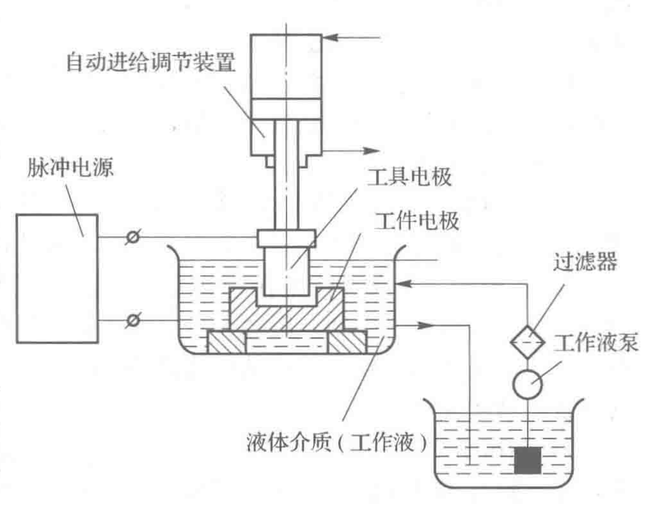


图 8-1 电火花加工原理图

第一次脉冲放电结束之后，经过很短的间隔时间，第二次脉冲又在另一极间最近点击穿放电。如此周而复始高频率地循环下去，工具电极不断地向工件进给，它的形状最终就复制在工件上，形成所需要的加工表面。与此同时，总能量的一小部分也释放到工具电极上，从而造成工具损耗。

从上面的叙述中可以看出，进行电火花加工必须具备三个条件，即必须采用脉冲电源；

必须采用自动进给调节装置，以保持工具电极与工件电极间微小的放电间隙；火花放电必须在具有一定绝缘强度($10\sim10^7\Omega\cdot m$)的液体介质中进行。

电火花加工具有如下特点：可以加工任何高强度、高硬度、高韧性、高脆性以及高纯度的导电材料；加工时无明显机械力，适用于低刚度工件和微细结构的加工；脉冲参数可依据需要调节，可在同一台机床上进行粗加工、半精加工和精加工；电火花加工后的表面呈现的凹坑，有利于储油和降低噪声；生产效率低于切削加工；放电过程有部分能量消耗在工具电极上，导致电极损耗，影响成形精度。

（2）电火花加工的应用

电火花加工主要用于模具中型孔、型腔的加工，它已成为模具制造业的主导加工方法，推动了模具行业的技术进步。电火花加工零件的数量在 3 000 件以下时，比模具冲压零件在经济上更加合理。按工艺过程中，工具与工件相对运动的特点和用途不同，电火花加工可大体分为电火花成形加工、电火花线切割加工、电火花磨削加工、电火花展成加工、非金属电火花加工和电火花表面强化等。

8.2.3 超精密加工技术

1. 概述

现代制造业持续不断地致力于提高加工精度和加工表面质量，主要目标是提高产品性能、质量和可靠性，改善零件的互换性，提高装配效率。超精密加工技术是精加工的重要手段，在提高机电产品的性能、质量和发展高新技术方面都有着至关重要的作用。因此，该技术是衡量一个国家先进制造技术水平的重要指标之一，也是先进制造技术的基础和关键。

超精密加工是指加工精度和表面质量达到极高程度的精密加工工艺，从概念上讲具有相对性，随着加工技术的不断发展，超精密加工的技术指标也是不断变化的。

目前，加工技术可以划分一般加工、精密加工、超精密加工以及纳米加工。

1）一般加工：加工精度在 $10\mu m$ 左右、表面粗糙度 R_a 为 $0.3\sim0.8\mu m$ 的加工技术，如车、铣、刨、磨、镗、铰等。它适用于汽车、拖拉机和机床等产品的制造。

2）精密加工：加工精度在 $10\sim0.1\mu m$，表面粗糙度 R_a 为 $0.03\sim0.3\mu m$ 的加工技术，如金刚车、金刚镗、研磨、珩磨、超精加工、砂带磨削、镜面磨削和冷压加工等。它适用于精密机床、精密测量仪器等产品中关键零件的加工，如精密丝杠、精密齿轮、精密蜗轮、精密导轨、精密轴承等。

3）超精密加工：加工精度在 $0.1\sim0.01\mu m$，表面粗糙度 R_a 为 $0.03\sim0.05\mu m$ 的加工技术，如金刚石刀具超精密切削、超精密磨料加工、超精密特种加工和复合加工等。它适用于精密元件、计量标准元件、大规模和超大规模集成电路的制造。目前，超精密加工的精度处在亚纳米级工艺，正在向纳米级工艺发展。

4）纳米加工：加工精度高于 $10^{-3}\mu m$，表面粗糙度 R_a 小于 $0.005\mu m$ 的加工技术，其加工方法大多已不是传统的机械加工方法，而是诸如原子、分子单位加工等方法。

2. 超精密切削加工技术

超精密切削加工技术主要是指金刚石刀具超精密车削，应用于加工铜、铝等非铁金属及其合金，以及光学玻璃、大理石和碳素纤维等非金属材料。

（1）超精密切削对刀具的要求

为实现超精密切削，刀具应具有如下性能：

1）极高的硬度、耐用度和弹性模量，以保证刀具有很长的寿命和很高的尺寸耐用度。

2）刃口能磨得极其锋锐，刃口半径卢 P 值极小，能实现超薄的切削厚度。

3）刀刃无缺陷，因切削时刃形将复印在加工表面上，而不能得到超光滑的镜面。

4）与工件材料的抗黏结性好、化学亲和性小、摩擦因数低，能得到极好的加工表面完整性。

（2）金刚石刀具的性能特征

目前，超精密切削刀具用的金刚石为大颗粒（0.5～1.5carat，1carat＝200mg）、无杂质、无缺陷、浅色透明的优质天然单晶金刚石，具有如下性能特征：

1）具有极高的硬度，其硬度达到 HV6 000～10 000，而 TiC 仅为 HV3 200，WC 为 HV2 400。

2）能磨出极其锋锐的刃口且切削刃没有缺口、崩刃等现象。普通切削刀具的刃口圆弧半径只能磨到 5～30μm，而天然单晶金刚石刃口圆弧半径可小到数纳米，没有其他任何材料可以磨到如此锋利的程度。

3）热化学性能优越，具有导热性能好，与有色金属间的摩擦因数低、亲和力小的特征。

4）耐磨性好，刀刃强度高。金刚石摩擦因数小，和铝之间的摩擦因数仅为 0.06～0.13，如切削条件正常，刀具磨损极慢，刀具耐用度极高。因此，天然单晶金刚石虽然价值昂贵，但一致公认为是理想的、不能代替的超精密切削刀具材料。

（3）超精密切削时的最小切削厚度

超精密切削实际能达到的最小切削厚度与金刚石刀具的锋锐度、使用的超精密机床的性能状态、切削时的环境条件等直接有关。1986 年日本大阪大学和美国 LLL 实验室合作进行的“超精密切削的极限”实验研究可知：在 LLL 实验室的超精密金刚石车床上，切削厚度为 1nm 时，仍能得到连续稳定的切屑，说明切削过程是连续、稳定和正常的。

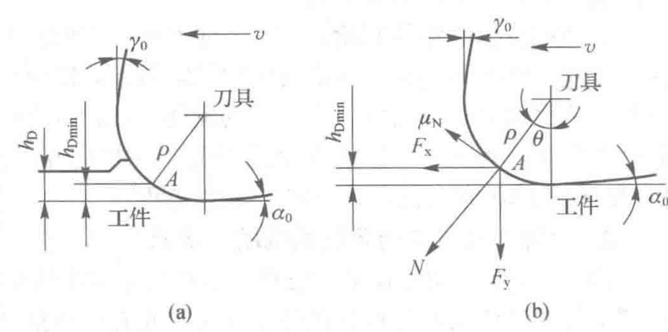


图 8-2　极限切削厚度与刃口半径 ρ 的关系

极限最小切削厚度 h_{Dmin} 与刀具刃口锋锐度（刀具刃口半径 ρ）的关系如图 8-2 所示。A 为极限临界点，在 A 点以上被加工材料将堆积起来形成切屑，而在 A 点以下，加工材料经弹性变形形成加工表面。A 点的位置可由切削变形剪切角（θ）确定，剪切角（θ）又与刀具材料的摩擦因数 μ 有关：当 μ=0.12 时，h_{Dmin}=0.322ρ；当 μ=0.26 时，h_{Dmin}=0.249ρ。

由最小切削厚度 h_{Dmin} 与刃口半径 ρ 的关系式可知，若能正常切削 h_{Dmin}=1nm，要求所用金刚石刀具的刃口半径 ρ 应为 3～4nm。国外报道研磨质量最好的金刚石刀具，刃口半径可以小到数纳米的水平；而国内生产中使用的金刚石刀具，刃口半径 ρ=0.2～0.5μm，特殊精心研磨可以达到 ρ=0.1μm。

8.3 制造自动化技术

8.3.1 计算机集成制造系统

1. 发展情况

计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacturing System，CIMS）是1974年由美国人约瑟夫·哈林顿首先提出的。这一新概念的核心内容是以下两点：

1）企业内各个生产环节从市场分析、产品设计、加工制造、经营管理到售后服务的全部生产活动是一个有机结合的整体，要作统一的、全盘的考虑。

2）整个生产过程是一个数据采集、传递和加工处理的过程，产品可看作是数据的物质表现。

这一概念到20世纪80年代初被广泛重视，并形成制造业新一代的一种生产管理方式。从20世纪70年代开始市场发生了重大变化，由于科技的飞速发展和市场需求的多样化相互作用，促使传统的、相对稳定的市场变成动态的、多变的市场。具体表现在：产品更新换代的时间越来越短，加速了从科技发展到应用的竞争；产品的品种、规格、型号日益增多；市场围绕品种、质量、价格、交货期、服务5大要素竞争越来越激烈。企业必须寻求一种新的生产管理方式来适应市场的变化。

从20世纪80年代开始，一些工业发达国家的政府，如美国、日本和欧洲共同体的成员国，都把CIMS作为科学技术发展的战略目标，制定各种计划、规划，建立国家级实验研究基地，积极推进这一新的生产方式的发展。我国在1987年开始实施的“高科技研究发展计划纲要”中也列入了CIMS方面的课题，一些高等院校和研究院所与企业相结合也开展了CIMS有关的研究项目，并取得了一些成果。

2. 计算机集成制造系统的构成及功能

CIMS是在自动化技术、信息技术和制造技术的基础上，通过计算机及通信网络将企业内部全部生产活动中各种分散的自动化单元有机地集合起来，实现以信息为特征的高度集成技术，是一种适应于多品种、小批量生产方式实现总体高效益的、高柔性的智能化系统。

从功能角度看，CIMS包含制造企业的设计、制造、质量控制和经营管理4个功能并以分布式数据库、通信网络及指导集成的系统作为支撑环境，如图8-3所示。

（1）设计功能

在CIMS中，其设计功能有CAD，CAE，CAPP和CAM。这里的CAD不是孤立的，而是内部及外部密切关联并带反馈的CAD，还包括产品的专家系统及仿真技术。CAE即计算机辅助工程分析，它可对零部件的机械应力、热应力进行有限元分析以及考虑成本等因素的优化设计。CAPP即计算机辅助工艺规程设计，它以派生式或创成式等CAPP来实现工艺编程。CAM的功能是按零件的形状及CAPP生成的工艺转换为NC代码，再进行刀具补偿等因素的后置处理。在CIMS系统中可将CAD/CAPP/CAM局部地集合起来。

（2）加工制造功能

按照NC代码将毛坯加工成合格零件并装配成产品。在这里，物料流动与信息交汇由计

算机及其网络将制造现场的信息进行初步处理后反馈到相关部门。加工制造系统由加工工作站、物料输送及储存工作站、检验工作站、刀具管理工作站和装配工作站组成。加工工作站主要是各类数控机床并有工业机器人配合，通过控制联网实现信息集成。物料输送及储存工作站由自动运载小车或各种传送带及机器人实现输送物料；由立体仓库、堆垛机、装卸工作站及自动控制系统完成物料储存。检验工作站是由数控三坐标测量机和各种自动化测试仪器并通过网络进行数据传递。刀具工作站实现刀具流的调度和管理，还包括中央刀库、换刀机器人、数据库等。装配工作站是由装有传感器的工业机器人及传送装置来实现的，并应用人工智能对系统进行协调控制。

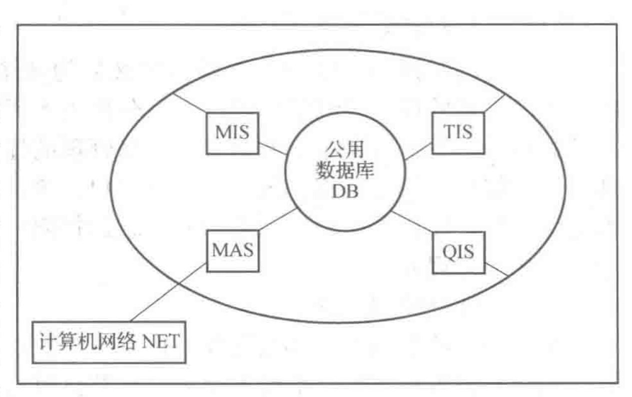


图 8-3　CIMS 的各功能块

（3）计算机辅助生产管理（CAPM）

在管理方面制定年、月、周生产计划、物料供应计划（MRP）、生产平衡以及财务、仓库等各种管理；在经营方面进行市场预测及制定长期发展战略规划。

（4）质量控制系统

借助计算机集成质量信息系统（QIS）将存在于设计、制造与管理中涉及质量的有关数据进行采集、存储和评价、处理，保证系统达到质量目标，QIS为 CIMS 的总目标奠定了良好的基础。

以上 4 个主要模块的集成运行是建立在系统工程理论和成组技术的基础上，并以分布式数据库管理系统和 IT 网络的支持，方能达到集成的目的。

3. 五层递阶控制模型

美国国家标准局自动化制造研究实验基地（AMRF）首次提出 5 层递阶控制模型，如图 8-4 所示。它是在对传统的制造管理系统按功能需求进行分析的基础上提出的，AMRF 分级控制结构由 5 级组成，即工厂级、车间级、单元级、工作站级和设备级。

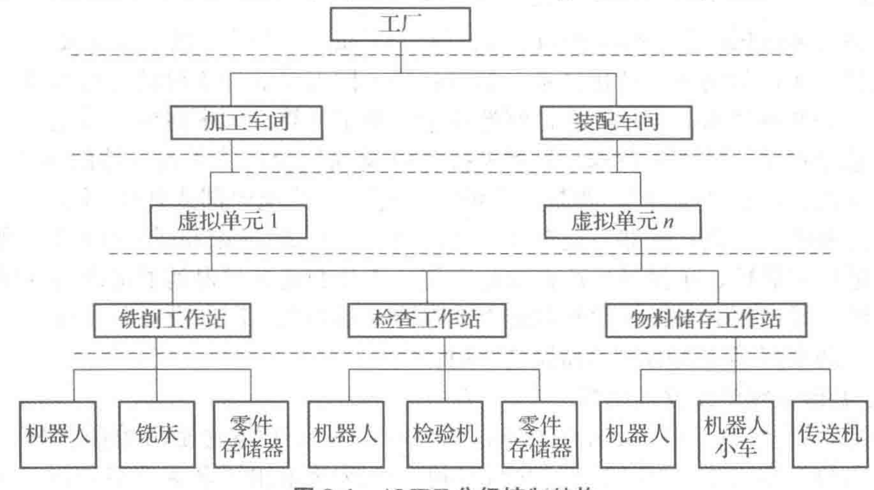


图 8-4　AMRF 分级控制结构

（1）工厂级控制系统

它是最高级控制，这一级主要功能又分为3个子系统：生产管理、信息管理和制造工程。生产管理的任务是制定生产计划、分配生产资源、确定追加投资、核算生产能力、汇总质量数据、向下一级发布生产指令。信息管理的任务是通过用户数据接口实施行政或经营管理功能，如成本估算、库存统计、处理用户订单、物资采购、人事及劳动工资处理。制造工程的任务是，通过人机交互以CAD系统设计零件及其他设计文件，以CAPP子系统设计每个零件的工艺规程。

（2）车间级控制系统

控制和协调车间生产和辅助性工作有两个主要管理模块：任务管理模块负责安排生产计划，把生产任务和资源分配给单元级，跟踪订单直至完成；资源分配模块负责分配单元级所需的工作站、储存区、托盘、刀具、材料等。

（3）单元级控制系统

虚拟单元级的具体工作内容是：完成任务分解和分析资源需求，安排工作站的任务并监控任务的执行情况，并向车间级报告作业情况和系统运行状态。

（4）工作站级控制系统

负责指挥和协调设备小组的生产活动，处理由物料储运系统交来的零件托盘、零件装夹、切削加工、清除切屑、中间检验、卸工件。它与虚拟单元采用同一接口实现动态控制。

（5）设备级控制系统

它是最前沿的系统，如设备、机器人、运输小车或其他传送装置、储存检索等控制器，还包括先进的计量检测系统，如：热误差和运动误差的监测及修正软件、在线超声波表面粗糙度检测、在线刀具磨损检测、机床的夹紧力及变形检测。向上与工作站接口，向下与各设备控制器接口，通过各种传感器监控加工运行。

新一代的CIMS不再过分强调全盘自动化，而是强调以人为中心的适度自动化，强调人、技术、管理三者的有机结合。

8.3.2 柔性制造技术

1. 概述

柔性制造技术（Flexible Manufacturing Technology，FMT）是一种主要用于多品种中小批量或变批量生产的制造自动化技术，是对各种不同形状的加工对象进行有效地且适应性地转化为成品的各种技术的总称。柔性制造技术是电子计算机技术在生产过程及其装备上的应用，是将数控技术、计算机技术、机器人技术以及现代管理技术为一体的现代制造技术，柔性制造技术的特点是“柔性”，即制造系统（企业）对系统内部或外部环境的一种适应能力，也是制造系统（企业）能够适应产品变化的能力。自20世纪60年代以来，为满足产品不断更新，适应多品种、小批量生产自动化需要，柔性制造技术得到了迅速的发展，出现了柔性制造系统、柔性制造单元、柔性制造自动线等一系列现代制造设备和系统，它们对制造业的进步和发展发挥了重大的推动和促进作用。

2. 柔性制造系统的定义与组成

柔性制造系统（Flexible Manufacturing System，FMS）概念是由英国莫林（MOLIN）公司最早提出的，并在1965年取得了发明专利，1967年推出了名为“Molins System-24”，（意思为可24h无人值守自动运行）的柔性制造系统。此后，世界各工业发达国家争相发展

和完善这项新技术，以此提高制造的柔性和生产效率。到目前为止，FMS尚无统一的定义。广义地说，柔性制造系统是由若干台数控加工设备、物料运储装置和计算机控制系统组成，并能根据制造任务或生产品种的变化迅速进行调整，以适应多品种、中小批量生产的自动化制造系统。

国外有关专家对FMS进行了更为直观的定义，即“柔性制造系统至少由两台机床、一套具有高度自动化的物料运储系统和一套计算机控制系统所组成的制造系统，通过简单改变软件程序便能制造出多种零件中任何一种零件”。

从上述定义可以看出，FMS主要由以下四个系统组成：

1）加工系统：包括由两台以上的CNC机床、加工中心或柔性制造单元以及其他的加工设备所组成，如测量机、清洗机、动平衡机和各种特种加工设备等。

2）工件运储系统：由工件装卸站、自动化仓库、自动化运输小车、机器人、托盘缓冲站、托盘交换装置等组成，能对工件和原材料进行自动装卸、运输和存储。

3）刀具运储系统：包括中央刀库、机床刀库、刀具预调站、刀具装卸站、刀具输送小车或机器人、换刀机械手等。

4）一套计算机控制系统：能够实现对FMS进行计划调度、运行控制、物料管理、系统监控和网络通信等。

图8-5所示为FMS的基本组成。

除了上述四个基本组成部分之外，FMS还包含集中冷却润滑系统、切屑运输系统、自动清洗装置、自动去毛刺设备等附属系统。

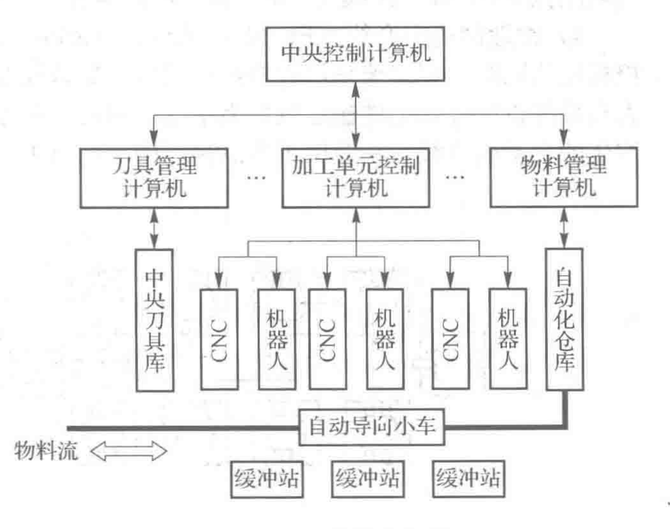


图8-5　FMS的基本组成

3. FMS的特点与适用范围

（1）FMS的特点

从FMS的定义及其组成可以看出，FMS具有如下特点：

1）柔性高，适应多品种中、小批量生产。

2）系统内的机床在工艺能力上是相互补充或相互替代的。

3）可混流加工不同的零件。

4）系统局部调整或维修不中断整个系统的运作。

5）递阶结构的计算机控制，可以与上层计算机联网通信。

6）可进行第三班无人值守生产。

关于FMS的柔性，有关专家认为，一个理想的FMS应具有如下几种柔性：

1）设备柔性，指系统中的加工设备具有适应加工对象变化的能力，衡量指标是当加工对象变化时系统软硬件变更与调整所需的时间。

2）工艺柔性，指系统能以多种方法加工某一族零件的能力，又称混流柔性，衡量指标是系统能够同时加工的零件品种数。

3）产品柔性，指系统能够经济而迅速地转换到生产一族新产品的能力，衡量指标是系统从一族零件转向另一族零件所需的时间。

4）工序柔性，指系统改变每种零件加工工序先后顺序的能力，衡量指标是系统以实时方式进行工艺决策和现场调度的水平。

5）运行柔性，指系统处理局部故障并维持生产原定工件的能力，衡量指标是系统发生故障时生产率下降程度或处理故障所需的时间。

6）批量柔性，指系统在成本核算上能适应不同批量的能力，衡量指标是系统保持经济效益的最小运行批量。

7）扩展柔性，指系统能根据生产需要能方便地进行模块化组建和扩展的能力，衡量指标是系统可扩展的规模和扩展难易程度。

（2）FMS的适用范围

若按系统规模和投资强度，可将柔性自动化制造设备分为如下五个不同的层次：

1）柔性制造模块（Flexible Manufacturing Module，FMM）。一台扩展了自动化功能的数控机床，如刀具库、自动换刀装置、托盘交换器等，FMM相当于功能齐全的加工中心。

2）柔性制造单元（Flexible Manufacturing Cell，FMC）。由1～2台数控机床组成，除了能够自动更换刀具之外，还配有存储工件的托盘站和自动上下料的工件交换台（见图8-6），FMC自成体系。它占地面积小、成本低、功能完善，有廉价小型FMS之称。

3）柔性制造系统（FMS）。它包括两台以上的CNC，FMM或FNC组成，其控制与管理功能比FMC强，规模比FMC大，对数据管理与通信网络要求高。

4）柔性制造生产线（Flexible Manufacturing Line，FML）。其加工设备在采用通用数控机床的同时，更多地采用数控组合机床，如数控专用机床、可换主轴箱机床、模块化多动力头数控机床等，工件输送线多为单线、固定，柔性较低、专用性强、生产率高，相当于数控化的自动生产线，一般用于少品种、中大批量生产。可以说，FML相当于专用FMS。

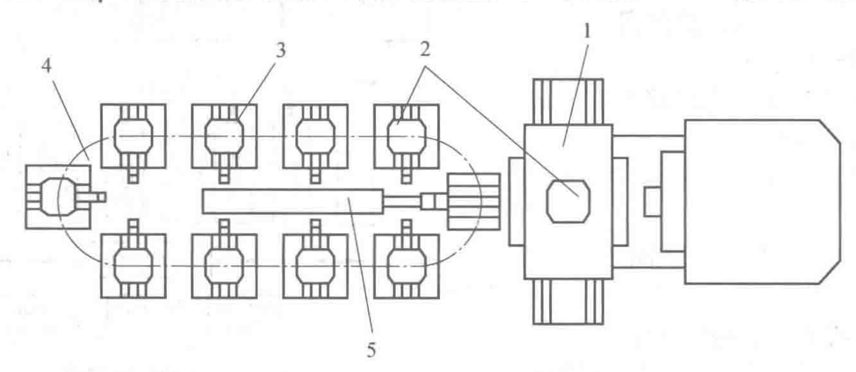


图8-6 柔性制造单元

5）柔性制造工厂（Flexible Manufacturing Factory，FMF）。将柔性制造自动化由FMS扩展到全企业范围，通过计算机网络系统的有机联系，实现在全企业范围内的生产经营管理过程、设计开发过程、加工制造过程和物料运储过程的全盘自动化，实现自动化工厂（Factory Automation，FA）的目标。

8.3.3 数字控制技术

1. 含义

数字控制（简称数控）技术是指用数字化信号（记录在媒介上的数字信息及数字指令）对设备运行及其加工过程进行控制的一种自动化技术。它是一种可编程的自动控制方式，它

所控制的量一般是位置、角度、速度等机械量，也有温度、压力、流量、颜色等物理量，这些量的大小不仅可用数字表示，而且是可测的。如果一台装置（如切削机床、锻压机械、切割机、绘图机）实现其自动工作的命令是以数字形式来描述的，则称其为数控装置。

数控机床就是采用了数控技术的机床，或者说是装备了数控系统的机床。国际信息处理联盟（IEIP）对数控机床做了如下定义：数控机床是装有程序控制系统的机床。该系统能够逻辑地处理具有使用编码或其他符号指令规定的程序。数控机床具有如下特点：

1）能够加工复杂型面零件，加工精度高，加工尺寸精度可达 0.005mm 以上，批量生产时，加工精度也很稳定；

2）加工效率高，加工过程中，能在一次装夹定位中加工多个表面，并能完成自动检测等工序，有效地提高了生产效率；

3）自动化程度高，减轻劳动强度，改善生产环境；

4）可以实现一机多用，替代多台普通机床，节省厂房面积；

5）采用数控机床，促进了单件小批量生产自动化的发展，实现柔性自动化生产；

6）由于不需要专用的工艺设备，采用通用工夹具，只要更换程序，就可适用不同品种及尺寸规格零件的自动化生产。

但是，数控机床初期投资和维护保养费用高，要求管理及操作人员的素质高。基于数控机床的特点，对于单件中小批量生产，形状复杂、精度要求高的零件加工，产品更新频繁、生产周期紧的生产任务采用数控机床生产，可以提高产品质量，降低生产成本，获得较高的经济效益。

数控技术是机械、电子、自动控制理论、计算机和检测技术密切结合的机电一体化高新技术。它能把机械装备的功能、可靠性、效率和产品质量提高到一个新的水平，使机械电子行业发生深刻的变化。可以说，数控技术是实现制造过程自动化的基础，是自动化柔性系统的核心，数控技术是现代集成制造系统的重要组成部分。由于数控技术在机械工业中的重要地位，近 10 年来，世界数控机床的数量增加了 10 倍，日本的数控机床品种已达 1 300 多种，机床产值数控化率为 70%，有些现代化机械加工车间，使用机床的数控化率已超过 90%。

总之，数控技术已成为当今工业设备、制造业中不可忽视的关键高新技术，对我国今后的技术进步和科学发展具有重要的先导作用，需大力发展。

2. 组成

图 8-7 所示为数控装置的基本组成框图。

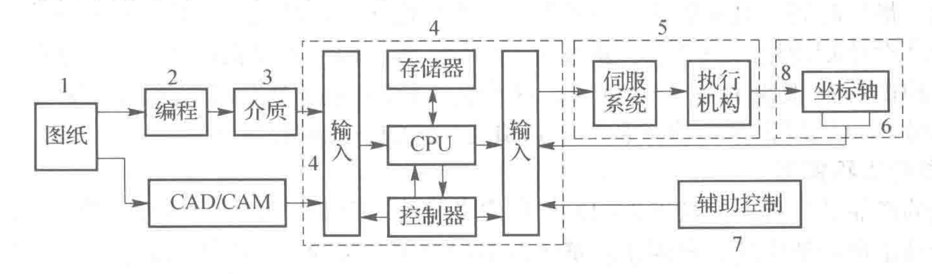


图 8-7 数控装置的基本组成框图

1—加工零件图样；2—程序编制部分；3—控制介质；4—数控系统；5—伺服驱动系统；6—坐标轴或执行机构的测量装置；7—辅助控制单元；8—坐标轴

3. 分类

1）按数控装置类型分类可分为硬件式数控系统和软件式数控系统。

2）按功能水平分类可以把数控系统分为高档、中档、低档数控系统三类。

3）按用途分类可把数控系统分为金属切削类数控系统、金属成形类数控机床和数控特种加工机床等三类。

4）按运动方式分类可分为点位控制系统、点位直线控制系统和轮廓控制系统三类。轮廓控制系统又称连续轨迹控制。该系统能同时对两个或两个以上的坐标轴进行连续控制，加工时不仅要控制起点与终点，而且要控制整个加工过程中的走刀路线和速度。它可以使刀具和工件按平面直线、曲线或空间曲面轮廓进行相对运动，加工出任何形状的复杂零件。它可以同时控制 2～5个坐标轴联动，功能较为齐全。在加工中，需要不断进行插补运算，然后进行相应的速度与位移控制。数控铣床、数控凸轮磨床、功能完善的数控车床、较先进的数控火焰切割机、数控线切割机及数控绘图机等，都是典型的轮廓控制系统。它们取代了各种类型的仿形加工，提高了加工精度和生产效率，因而得到广泛应用。

5）按控制方式分类可分为以下几类：

a. 开环控制系统。不具有任何反馈装置的数控系统，无检测反馈环节。

b. 半闭环控制系统。在开环数控系统的传动丝杠上装有角位移检测装置，如光电编码器、感应同步器等，通过丝杠的转角间接地检测移动部件的位移，然后反馈至控制系统中。

c. 闭环数控系统。在移动部件上直接装有直线位置检测装置，将测量的实际位移值反馈到数控装置中，与输入的位移值进行比较，用差值进行补偿，使移动部件按照实际需要的位移量运动，实现移动部件的精确定位。闭环数控系统的控制精度主要取决于检测装置的精度、机床本身的制造与装配精度。

8.4 先进制造模式

8.4.1 并行工程

1. 概述

并行工程（Concurrent Engineering，CE），是 20 世纪 90 年代初针对如何以最低成本、最高质量、最短时间、最优服务，开发出满足用户需求的产品这一全球性的竞争焦点而发展起来的产品设计新理论、新概念、新方法。并行工程着眼于产品由设计概念变成投放市场的商品并直到由用户报废的这一全过程。这是在 CIMS 基础上发展起来的，更紧密地集成 CAD，CAPP，CAM 及售后服务从而达到预定目标的系统设计方法。

2. 并行工程构思

传统的产品开发模式为功能部门制，信息共享存在障碍；串行的流程，设计早期不能全面考虑产品生命周期中的各种因素；基于图纸的手工设计为主，设计表达存在二义性，缺少先进的计算机平台，不足以支持协同化产品开发。全球化大市场的形成，要求企业必须改变经营策略，提高产品开发能力、增强市场开拓能力，但传统的产品开发模式已不能满足激烈的市场竞争要求，因而提出了并行工程的思想。并行工程是一种企业组织、管理和运行的先进设计制造模式；是采用多学科团队和并行过程的集成化产品开发模式。它把传统的制造技

术与计算机技术、系统工程技术和自动化技术相结合，在产品开发的早期阶段全面考虑产品生命周期中的各种因素，力争使产品开发能够一次获得成功，从而缩短产品开发周期、提高产品质量、降低产品成本。因此，利用并行工程对于提高我国企业新产品开发能力、增强其竞争力具有深远的意义。

3. 并行工程的关键支持技术

并行工程是集成并行地设计产品及相关过程的系统化方法，它要求产品开发人员从设计一开始即考虑产品生命周期中的各种因素。其关键技术包括如下几方面：

(1) 并行产品开发过程建模、仿真与优化

并行工程与传统生产方式的本质区别在于它把产品开发的各个活动作为一个集成的、并行的产品开发过程，强调下游过程在产品开发早期参与设计过程；对产品开发过程进行管理和控制，不断改善产品开发过程。

(2) 并行工程的集成产品开发团队

产品开发由传统的部门制或专业组变成以产品（型号）为主线的多功能集成产品开发团队（IPT）。

(3) 并行工程协同工作环境

在并行工程产品开发模式下，产品开发是由分布在异地的、用多种计算机软件工作的多学科小组完成的。多学科小组之间及多学科小组内部各组成人员之间存在着大量相互依赖的关系，并行工程协同工作环境支持 IPT 的异地协同工作。协调系统用于各类设计人员协调和修改设计，传递设计信息，以便作出有效的群体决策，解决各小组间的矛盾。产品数据管理（Production Date Management，PDM）系统构造的 IPT 产品数据共享平台，在正确时间将正确的信息以正确的方式传递给正确的人；基于 Client/Server 结构的计算机系统和广域的网络环境，使异地分布的产品开发队伍能够通过 PDM 和群组协同工作系统进行并行协作产品开发。

(4) 数字化产品建模与 CAX/DFX 使能工具

基于一定的数据标准，建立产品生命周期中的数字化产品模型，特别是基于 STEP 标准的特征模型。产品设计主模型是产品开发过程中惟一的数据源，用于定义覆盖产品开发各个环节的信息模型，各环节的信息接口采用标准数据交换接口进行信息交换。数字化工具定义是指广义的计算机辅助工具集。最典型的有 CAD，CAE，CAPP，CAM，CAFD（计算机辅助工装系统设计），DFA（面向装配的设计），DFM（面向制造的设计），MPS（加工过程仿真）等。它们被广泛用于 CE 产品开发的各个环节，在 STEP 标准的支持下，实现集成的、并行的产品开发。

4. 并行工程的应用

并行工程自提出以来，受到了国内外学术界、工业界和政府部门的重视。并行工程在航空、航天、机械、电子、汽车、建筑、化工等工业中的应用已越来越广泛，成为现代制造技术的重要内容之一。从 1994 年起，每年举行一次国际并行工程学术会议，研究和探讨并行工程的理论、技术和方法，以促进全球制造技术水平的提高。并行工程正在迅速发展，其进一步的研究和应用主要有以下几方面：

1) 并行工程作为一种哲理，越来越多地融合虚拟制造和拟实制造。通常认为计算机集成制造的重点在于实现企业的信息集成；并行工程是以信息集成为基础，实现产品开发过程的集成与并行；敏捷制造的目标是实现企业间的集成，虚拟制造、拟实制造、企业经营过程重构等是实现其敏捷性的关键手段，而并行工程则是实现敏捷制造的基础。

2) 并行工程是一种工程方法论，其目的是在产品设计的早期阶段就能考虑到工艺、制

造，生产等后期工作的各个因素，以提高产品设计、制造的一次成功率，从而缩短产品开发周期，降低成本，增强企业的市场竞争能力。

3）产品数据管理（PDM）是实现并行工程的关键，有待进一步完善。产品数据管理集数据库的数据管理能力、网络通信能力和过程控制能力于一体，不仅能对分布环境中产品数据进行统一管理，而且能对并行工程予以有力支持，它是一门管理产品信息和产品生命过程的技术。

4）并行工程作为一种哲理，现阶段已成功地用于机械、电子、化工等工程领域，其应用范围已逐渐向建筑、水利、教育等更多领域发展。

8.4.2 精益生产

1. 概述

20 世纪 70 年代后期，随着日本经济的崛起，美国和西欧的汽车市场受到严峻的考验。为了探索日本经济腾飞的奥秘，重新夺回美国在制造业尤其是汽车工业的优势，1985 年由美国麻省理工学院启动了一个“国际汽车研究计划 IMVP”，由 53 名专家、学者参加，历时 5 年，对 14 个国家的近 90 个汽车装配厂进行实地考察，查阅了几百份公开的简报和资料.并对西方的大量生产方式与日本的丰田生产方式进行对比分析，最后证实了丰田生产模式不仅使丰田公司一跃成为举世瞩目的汽车王国，还推动了日本经济飞速发展。1990 年，由三位主要负责人对丰田生产模式进行了全面总结，出版了《改变世界的机器》一书，书中第一次将丰田生产模式称为“精益生产（Lean Production，LP)”，认为制造业正从大批、大量生产方式向精益生产方式转变。这个研究成果在汽车业内引起轰动，掀起了一股学习精益生产方式的狂潮。精益生产方式的提出，把丰田生产方式从生产制造领域扩展到产品开发、协作配套、销售服务、财务管理等各个领域，贯穿于企业生产经营活动的全过程，使其内涵更加全面，更加丰富，对指导生产方式的变革更具有针对性和可操作性。精，即少而精，不投入多余的生产要素，只是在适当的时间生产必需数量的市场急需产品（或下道工序急需的产品)；益，即所有经营活动都要有效益，具有经济性。精益生产是对传统的“大规模生产方式”提出的挑战，人们把它称之为世界级制造技术的核心。

2. 精益生产体系的结构与特征

精益生产体系的基础是计算机网络支持下的小组工作方式，在此基础上的三根支柱即为：①准时生产（JIT），它是缩短生产周期、加快资金周转、降低成本、实现零库存的主要方法；②成组技术（CT），它是实现多品种、小批量、低成本、高柔性，按顾客订单组织生产的技术手段；③全面质量管理（TQC)，它是保证产品质量、树立企业形象和达到无缺陷目标的主要措施。精益生产体系如图 8-8 所示。

(1) 精益生产体系的目标

1）精益生产的基本目标

精益生产是采用灵活的生产组织形式，根据市场需求的变化，及时、快速地调整生产，依靠严密细致的管理，通过“彻底排除浪费”，防止过量生产来实现企业的利润目标的。因此，精益生产的基本点是要在一个企业里，同时获得极高的生产率、极佳的产品质量和很大的生产柔性。为实现这一基本目

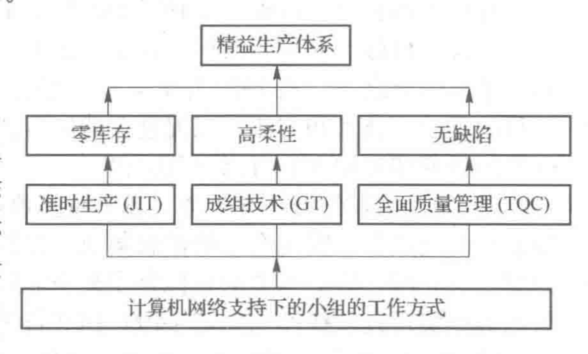


图 8-8 精益生产体系

的，精益生产必须能很好地实现：零库存、高柔性（多品种）、无缺陷等三个子目标。

2）精益生产的子目标

a. 零库存。在传统生产系统中，制品库存和成品库存被视为资产，期末库存与期初库存之差代表这一周期流动资产的增值，用以表示该部门效益的提高。当由不确定的供应者供应原材料和外购件时，原材料和外购件的库存可视为缓冲器。所以，原材料、外购件和成品的库存作为供应者不按期供货或顾客订购量增加的缓冲。工厂的效率是用车间设备利用率来考核的，车间管理人员的责任是保持各设备及工作中心连续不断地运行，达到满负荷工作，即使设备加工的零件并不是现在订单所需的，继续生产会加大库存也在所不惜。事实上，一个充满库存的生产系统，会掩盖系统中存在的各种问题。例如，设备故障造成停机，工作质量低造成废品或返修，横向扯皮造成工期延误，计划不周造成生产脱节等，都可以动用各种库存，使矛盾钝化、问题被淹没。表面上看，生产仍在平衡进行；实际上，整个生产系统可能已千疮百孔。更可怕的是，如果对生产系统存在的各种问题熟视无睹、麻木不仁，长此以往，紧迫感和进取心将丧失殆尽。因此，提出"向零库存进军"的口号，"零库存"就成为精益生产追求的主要目标。

b. 高柔性。高柔性是指企业的生产组织形式灵活多变，能适应市场需求多样化的要求，及时组织多品种生产，以提高企业的竞争能力。随着科学技术的迅速发展，新产品不断涌现，产品复杂程度也随之提高，而产品的市场寿命日益缩短，更新换代加速，大量生产方式遇到了挑战。因为在大量生产方式中，柔性和生产率是相互矛盾的。面临市场多变这一新问题，精益生产方式必须以高柔性为目标，实现高柔性与高生产率的统一。为实现柔性和生产率的统一，精益生产必须在组织、劳动力、设备三方面表现出较高的柔性。

(i) 组织柔性。在精益生产方式中，决策权力是分散下放的，而不是集中在指挥链上。它不采用以职能部门为基础的静态结构，而是采用以项目小组为基础的动态组织结构。

(ii) 劳动力柔性。市场需求波动时，要求劳动力作相应的调整。精益生产方式的劳动力是具有多方面技能的操作者，在需求发生变化时，可通过适当调整操作人员的操作来适应短期的变化。

(iii) 设备柔性。与刚性自动化的工序分散、固定节拍和流水生产的特征相反，精益生产采用适度的柔性自动化技术（数控机床与多功能的普通机床并存）。它以工序相对集中、没有固定节拍以及物料的非顺序输送的生产组织方式，使精益生产在中小批量生产的条件下，接近大量生产方式由于刚性自动化所达到的高效率和低成本，同时具有刚性自动化所没有的灵活性。

c. 无缺陷。传统的生产管理很少提出无缺陷的目标，一般企业只提出可允许的不合格百分比和可接受的质量水平。它们的基本假设是：不合格品达到一定数量是不可避免的。而精益生产的目标是消除各种引起不合格品的原因，在加工过程中每一工序都要求达到最好水平。追求产品质量要有预防缺陷的观念，凡事第一次就要做好，建立"无缺陷"质量控制体系。这是支撑个人与企业生命的精神力量，是在永无止境的学习过程中获得自我满足的境界。应该记住这样一句名言："价格是可以商量的，但是质量是没有商量余地的。"

（2）精益生产体系的支柱

1）准时生产（JIT）。准时生产是精益生产的目标，这种方法的核心就是追求"零库存"的生产系统。

2）成组技术（GT）。成组技术是精益生产的基本条件，是提高生产柔性、实现高柔性目标的有效手段。

3）全面质量管理（TQC）。全面质量管理是实现"无缺陷"目标的有效手段，也是提

高企业总体效益和柔性的方法。

（3）精益生产体系的基础

在生产组织上，精益生产方式与泰勒方式不同，不是强调过细的分工，而是强调企业各部门相互密切合作，把工作重心和主要精力转移到生产现场上来，要以满足现场的需要、解决现场存在的问题作为第一位的工作。同时，精益生产针对传统大量生产方式企业的生产组织机构过于臃肿的现象，提出了“精简、消肿”的对策，把企业各部门的人员分配到生产第一线的各个工作小组，大大精简了机构，减少了管理层次，既节省了大笔的行政开支，又提高了管理效率。

生产一线的工作小组是企业集成各方面人才的一种组织形式。它是在计算机网络的支持下，由企业各部门专业人员，如机、电、工具、计划调度、技术、工艺等人员组成的面向项目的综合工作组。一个工作小组全面负责一个产品型号的开发和生产，包括设计、编制预算、材料购置、生产准备及投产等工作，并及时根据实际情况调整原有的设计和计划；现场工作小组是一种高效运转的生产组织，能迅速有效地解决现场中出现的问题。所以说，计算机网络支持下的小组工作方式是实施精益生产的基础。

（4）精益生产体系的特征

综上所述，精益生产的特征可以总结为：以用户为上帝，以职工为中心，以精简生产过程为手段，以产品的零缺陷为最终目标。

1）以用户为上帝。企业要面向用户，保持与用户的密切联系，真正体现用户是上帝。不仅要向用户提供服务，而且要了解用户的要求，以最快的速度和适宜的价格，以高质量的适销新产品去抢占市场。

2）以职工为中心。现代企业一方面要不断技术进步，另一方面要以人为中心，大力推行更适应市场竞争的小组工作方式。让每一个人在工作中都有一定程度的制定计划、判断决策、分析复杂问题的权力，都有不断学习新的生产技术的机会，培养职工相互合作的品质。同时对职工素质的提高不断进行投资，充分发挥他们的积极性与创造性。此外，企业一方面要为职工创造工作条件和晋升途径；另一方面又给予一定的工作压力和自主权，以同时满足人们学习新知识和实现自我价值的愿望，从而形成独特的、有竞争意识的企业文化。

3）以精简为手段。精益生产将去除生产过程中的一切多余的环节，实行精简化。在组织结构上，纵向减少层次，横向打破部门壁垒，将多层次、细分工的管理模式转化为分布式平行网络的管理结构。在生产过程中，采用先进的设备（例如采用加工中心，实行工序集中，尽可能在一个工作地完整地加工零件），减少非直接生产工人，使每个工人的工作都真正对产品进行增值。精简还包括：在减少产品的复杂性的同时，提供多样化的产品。采用成组技术是实现精简化和提高柔性化双重目标的关键。

4）以零缺陷为目标。精益生产所追求的目标不是“尽可能好一些”，而是“零缺陷”，即最低的成本，最好的质量，无废品，零库存与产品的多样化。当然，一个企业不可能完全达到这样的境地，但永无止境地去追求这一目标，将会使企业发生惊人的变化。

3. 精益生产方式对现代制造业的影响及意义

（1）精益生产方式是对传统大量生产方式的扬弃

精益生产的基本目的是在一个企业里同时获得极高的生产率、极佳的产品质量和很大的生产柔性。精益生产不仅要求在技术上实现制造过程和信息流的自动化，更重要的是从系统工程的角度对企业活动及其社会影响进行全面的、整体的优化。精益生产体系在企业的经营观念、管理原则、生产组织、生产计划与控制、作业管理，以及对人的管理等各方面，都与传统的大量生产方式有明显的不同，见表 8-2。

从表中可见，精益生产方式首先在产品质量上追求尽善尽美，保证用户在产品整个生命周期内都感到满意。在企业内的生产组织上，充分考虑人的因素，采用灵活的小组工作方式和强调相互合作的并行工作方式。在物料管理方面，准时的物料后勤供应和零库存目标使在制品大大减少，节约了流动资金。在生产技术上采用适度的自动化技术又明显提高了生产效率。所有这一切，都使企业的资源能够得到合理的配置和充分的利用。

(2) 现代制造业应用精益生产方式的优越性及其意义

随着市场环境向多样化方向的变化和竞争的加剧，精益生产方式的应变能力以及对质量、成本、生产周期的有效控制方法，对众多制造业的影响也越来越大。精益生产方式作为一种追求生产的合理性、高效性，能够灵活多样地生产适应各种需求的高质量产品的生产技术和管理技术，其基本原理和诸多方法，对许多其他制造行业的企业也都具有积极的意义。精益生产的核心，即关心生产计划和控制以及库存管理的基本思想，对丰富和发展现代生产管理理论具有重要的作用。

表 8-2　精益生产与传统大量生产方式比较

	精益生产方式	大量生产方式
生产目标	追求尽善尽美	尽可能好
分工方式	集成、综合工作组	分工、专业化
产品特征	面向用户和生产周期较短的产品	数量很大的标准产品
生产后勤	准时生产（JIT）的后勤支援	在所有工序均有在制品缓冲存储
产品质量	在生产过程的各个环节始终由工人开展质量保证活动	由检验部门事后进行质量检验
自动化	柔性自动化，但尽量精简化	倾向于刚性和复杂的自动化
生产组织	加快速度的“同步工程”模式	依次实施顺序工程模式
工作关系	强调工作友谊，团结互助	感情疏远，工作单调，缺乏动力

4. 精益生产在我国的实践

精益生产方式在 20 世纪 70 年代末期由日本引入我国。长春第一汽车制造厂是最早引进精益生产方式的企业。1979 年下半年，“一汽”开始边学习，边创造条件，边试点，逐步推广应用精益生产模式。到 1984 年，在短短的实行精益生产四年的时间里，在 20 个专业厂有 2 831 种汽车零部件实行“看板”取货，42 种协作产品由协作厂直送工位，压缩了流动资金 1 830 万元，取消中间仓库 17 个，节约仓库面积 1 661m^2。在“看板”取货的基础上组织了“看板”生产，全厂 10 条生产线 61 种零件实行了“看板”生产。20 世纪 80 年代初，中国企业管理协会组织推广现代管理方法，“看板管理”被作为推广的现代管理方法之一，在全国范围内进行宣传，并为许多企业所采用。

近年来，我国企业对精益生产方式有了进一步的认识，在汽车、电子、仪表制造业等实行流水生产的企业中应用精益生产，获得了明显的效果。例如，第一汽车制造厂、第二汽车制造厂、上海大众汽车有限公司、四川仪表四厂等一批企业，应用精益生产，并结合我国国情、厂情进行了创造性的工作，取得了丰富的经验，创造了良好的经济效益。

8.4.3 敏捷制造

1. 概述

20 世纪 80 年代，美国制造业的优势不断丧失，为改变这一局面，重新夺回制造业的优

势，美国把发展战略瞄准21世纪。20世纪90年代初，里海(Lehigh)大学在美国国防部的资助下，耗资500余万美元，工作了1 000多个人日，调查了百余个厂家，最终完成了《21世纪制造企业战略》的报告，报告中首次提出了“敏捷制造的新概念”，描述了敏捷制造的未来前景，并提出采用敏捷制造的生产方式以重新夺回美国制造业的优势。

敏捷制造技术（Agile Manufacturing，AM）是将柔性的、先进的、实用的制造技术，高素质、多技能的劳动者和企业内与企业间的灵活管理三者有机集成，不仅在产品质量、功能、价格上，而且在缩短交货期、保护资源以及对顾客最大满意程度等方面实现总体优化，快速响应市场多样性的需求，敏捷制造目标的实现将会是制造业的一次革命。

2. 产生的背景

随着市场的变迁，企业制造战略随之不断发生变化。

20世纪70年代以前，产品生命周期很长，设计和开发费用不是产品成本的主要部分。规模化生产极大地提高了劳动生产率，大幅度降低了成本。

进入20世纪70年代，价格是市场竞争的主要因素，产品的成本结构发生了本质的变化，劳动力费用不再是成本的主要部分。降低成本的主要努力方向是提高企业的整体效率和效益，准时生产（JIT）和精良生产原则的出现，都是为了能协调企业系统的各个环节，去除企业中冗余的部分，利用现有的生产条件生产出更多的产品。

20世纪80年代以来，用户对产品的要求不断提高，竞争越来越激烈，满足用户的质量要求成为企业竞争的核心内容。全面质量控制（TQC）的目的是生产高质量的产品。在该时期，国际标准化组织提出了ISO 9000质量标准。

20世纪90年代后期，用户更加要求个性化的产品，产品生命周期变短，市场变化很快。企业要赢利，需要有响应市场变化的能力，在别人没有生产出新产品之前，能以最短的时间开发出高质量以及用户能接受的新产品。敏捷制造的目标就是要使企业具有这种能力。

图8-9描绘了美国制造业的经营战略的变迁过程：20世纪50年代和60年代崇尚“规模效益第一”，70年代追求“价格竞争第一”，80年代主要关注“产品质量第一”，到后来的90年代则“市场响应速度第一”成为企业获益和生存的首要考虑条件。

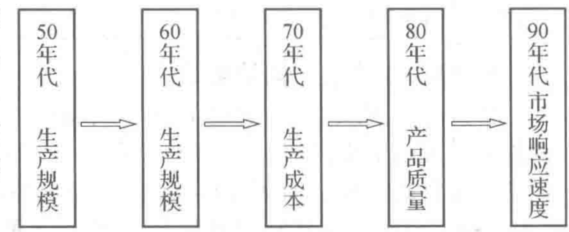


图8-9 美国制造业的变迁

现在，世界各地都有人在研究敏捷制造。国内的学术界从20世纪90年代也开始了有关敏捷制造的研究，并取得了一定的成果。随着国内企业越来越多地参与国际的竞争和国有企业改革的日益深人，对适合中国国情的敏捷制造技术进行更深入的研究是很有必要的。

3. 敏捷制造的构思

(1) 新的企业概念

通过信息高速公路，使企业进行国内乃至国际的进一步集成，建立全新的企业—“虚拟企业”或“虚拟公司”。为了完成某一项特定任务，通过信息高速公路在网络的范围内寻找合适的设计师和生产协作企业，这种动态的联合体共同承担职责与义务、共同冒险、共同获利，一旦该特定任务完成，该动态的联合体随之解体。下次新的任务来临，又进行一次相似的联合与解体过程。

(2) 全新的产品概念

产品的设计采用柔性的和模块化的方法，使不断投入市场的产品功能和使用性能完全根

据顾客需要而不断改变或完善。

(3) 全新的组织管理观念

敏捷制造用分散的决策替代集中控制，用协商机制替代“金字塔”结构的控制机制。敏捷企业的基层组织是多学科群体，是以任务为中心的一种动态组合。动态的虚拟公司可将国内或民办范围内的资源集成在一起，以最短的时间、最好的质量、合理的价格、优质的服务优化完成任务。

(4) 全新的生产概念

产品成本与批量无关，从产品看是单件生产，而从具体设计和制造部门看，却是大批量生产；强调企业必须完全服务于社会，要全面消除企业生产可能给社会造成的不利影响，如提倡清洁生产、消除污染等。

敏捷制造是现代集成制造系统从信息集成发展到企业集成的必由之路，它的发展水平代表了现代集成制造系统的发展水平，是现代集成制造系统的发展方向。

自从 1991 年美国提出敏捷制造的思想后，美国政府就赞助许多研究单位开发实现敏捷制造的基础结构和工具，并鼓励在不同行业进行示范应用，目前已经取得了一定进展。例如，在遥测装置生产的敏捷制造示范项目中，它联合了加利福尼亚的圣地亚国家实验室、联合信号公司得克萨斯城分部和新墨西哥的圣地亚国家实验室，以及机械主箱、印刷电路板供应商。通过联合弥补了单一企业资源不足的弱点，这一联盟的生产时间比单一企业的生产时间减少了 50%，生产率提高显著。现在美国的很多大公司都参加了这一研究计划。在欧洲和日本等发达国家也纷纷成立了相应的机构，进行相应的研究和实施工作。我国专家从 1993 年就开始对敏捷制造进行跟踪研究，主要包括：实施敏捷制造的技术基础；虚拟公司的建立步骤及其体系结构和运行模式；虚拟公司的组织与应用等。与国外相比，这些研究工作只能算原则性的研究工作，距离实用还需要走很长的一段路。因此，在我国企业目前还不可能实现敏捷制造，但是从科学研究的角度看，我们认为需要在合适的条件下建立一个研究性的虚拟企业，加深我们对虚拟企业在实际应用中所遇难题的理解，即在实践中吸取有益的经验，为今后的发展做一定的技术储备。

4. 敏捷制造的特点

敏捷制造是 CIMS 的自然发展和延伸，从一个企业内部的集成延伸到企业间的动态集成。与当代其他生产模式相比，敏捷制造的主要特点是提出了柔性重构和虚拟公司的概念。这是一种高度灵活性的重构兼容概念，通过这种模块化设计不仅能为用户提供功能全新的产品，而且能通过“模块重构”来改进和延长产品寿命，在企业和用户之间建立战略依存关系。这种产品重构还可以在全球范围内合作，即通过“虚拟公司”来实现产品的敏捷制造。虚拟公司是一种抓住和利用迅速变化的市场机遇，通过信息技术联系起来的临时性网络。

网络中各成员企业充分信任与合作，发挥各自的核心优势，共享技术、分担费用，将最优的零部件集成在一个产品上，以最快的速度把最好的产品推向市场。一旦市场机遇逝去，该虚拟公司立即解体，也就是说，每个成员企业就像一个接插件，可以在一个兼容机座上互插而形成一个新企业。通过柔性重构和虚拟公司的运作可迅速而有效地集成而满足某个特定市场机遇所需的全部资源（分散在不同地域或属于不同的产权主体），从而对市场变化作出积极的响应。

敏捷制造具有下列特点：

1）要求企业具有高度的敏捷性，即能抓住转瞬即逝的机会快速推出高性能、高可靠性和用户可接受价格的新产品。

2）要求发展一种可编程、可重组、模块化加工单元，以实现快速生产新产品及各种各样的变形产品，从而使生产小批量、高性能产品能达到与大批量生产一样的效益，做到产品价格和生产批量无关。

3）强调竞争，也强调合作，通过动态联盟的方式，联合优势互补的企业通过合作一起参加竞争。

4）要求企业最大限度地调动人的积极性，来维持和加强它的创新能力。

5）从适应变化、驾驭未来的角度，不仅强调适应今天市场的挑战，更注重于对未来市场的适应和占有，注重企业随着市场变迁而不断自我调整的能力。

8.5 先进生产管理技术

8.5.1 准时生产

1. 概述

准时生产（Just-in-Time，JIT）是起源于日本丰田汽车公司的一种生产管理模式，其基本思想是“只在市场需要的时候就按需要的量生产所需的产品”。这种方法的核心就是追求“零库存”的生产系统（或最小库存量），为此开发了包括“看板”在内的一系列措施，逐步形成一套独具特色的生产体系，丰田生产方式即JIT生产方式。

2. JIT的目标和实施手段

（1）JIT的目标

JIT的目标是获取最大利润，为达此目的必须着力于降低成本。大批、大量的生产类型降低成本主要是依靠加大单一品种的生产规模来实现的，但在多品种、小批量的生产情况下，这种方法行不通，JIT生产方式是力图通过彻底杜绝浪费来达到这一目的。丰田认为一切使成本增加的因素都是浪费，其中主要的浪费是生产过剩（即库存量大）所引起的。因此，为了排除这种浪费就必须坚持“适时、适量生产”“弹性配置作业人数”以及“保证质量”。这正是实现总目标的3个子目标。

（2）JIT生产方式的基本手段

1）适时、适量生产。适时、适量生产，即“只在市场需要的时候，就按照需要的量生产所需的产品”。企业中各种产品的产量必须灵活地适应市场的需求变化，力争做到以销定产。不然就会导致“生产过剩”，造成人员、设备、库存、费用增加和流动资金的积压。

2）弹性配置劳动力。降低劳动力工资也是降低成本的一个重要方面，其措施是实现“少人化”，即根据生产量的变动，弹性地增减生产线上的作业人数。这一方式对传统的定员定岗劳动配置是一种变革，是一种全新的劳动力配置方式。实现这种“少人化”作业方式，必须将设备独特布置，以便产量增大时将工序分散，产量减少时将工序集中。这就使作业内容、作业组合以及作业顺序要适时变更，而且操作人员必须是具备多种技能的“多面手”。

3）质量保证。历来都以为，质量和成本是一种负相关关系，即提高质量就得多花人力、物力，但JIT却一反这一常识，它将质量管理贯穿于每一工序来达到提高质量和降低成本的一致性。它在管理机制上采取了相应的措施：其一是使设备或生产线在线自动检测，一旦发现生产系统异常立即自动停车（或进行自动补偿）；其二是将质量控制权下放到工人，操作

工人发现产品或设备有问题，有权自行决策停止生产。这种管理机制可防止不良产品的出现和累积出现。这与传统的质量管理方式是完全不同的。传统的质量管理方法是在最后一道工序对产品进行检验、决定报废或返修，尽量不让生产线停止，以保证生产节拍。

除此以外，实现适时、适量生产还必须使生产同步化和生产均衡化。所谓同步化即工序之间不设置仓库，及时进行上下工序的转换，机加工线和装配线几乎平行生产作业。实现同步化的措施是通过“后工序领取”法，即后工序只在需要时才到前工序领取所需的加工制件，而前工序按领走的制件品种数量进行生产。装配线成为生产的出发点，生产计划只下给装配车间。所谓生产的均衡化，是指总装配线在向前工序领取制件时，要均衡地使用各种零、部件制品，为此在制定计划时就必须合理地配置人员和设备，生产均衡化是保证适时、适量生产的前提条件。

3. 看板管理

看板的机能是传递生产和运送的指令。JIT的日生产计划只下达到总装生产线，用“后工序领取”法向前工序领取制件并下达生产指令是通过看板实现的，看板就相当于各工序之间、物流之间的联络神经。看板记载着生产量、加工方法、加工顺序、工时和运送量以及运送地点、运送时间、搬运工具等信息。从装配线出发逐步向前追溯，领走制件和传递指令，保证生产适时、适量地进行。另外，看板可以实现目视管理。作业现场的管理人员对生产进行，情况一目了然，能及时发现问题，便于采取改善对策，保证“不把不良制品送到后工序”，宁可使问题暴露、全线停工，也要及时采取改善措施将问题解决，以确保产品质量。

8.5.2 产品数据管理技术

1. 概述

产品数据管理（Product Data Management，PDM），它是当今计算机应用领域的重要技术之一。产品数据管理技术是从CAD/CAM和工程设计领域产生出来的，自20世纪80年代中期以来，人们就初步认识到产品数据管理的作用。最初，人们以协调制图的存储和检索的文件管理方式建立系统，来跟踪以CAD/CAM产生的绘图；接着，增加了修订功能以便使用者能更好地管理设计变化；其后，又增加了将图形文件与产品结构中相关信息连接起来酌功能。进入20世纪90年代后期，人们更进一步地认识到产品数据管理的重要性，当没有现实产品数据管理系统时，数据流十分复杂，一些关键的数据可能存储于好多个地方，不仅使检索烦琐，而且当某处数据发生改变时而难以保证其他存储处数据的一致性。另外，随着计算机技术在企业中的应用不断深入，使CAD，CAPP，CAE，CAM，MPRII也逐渐在企业中广泛应用，但这些应用多为分散孤立的单项应用，在数据交换和管理上存在着很多问题，难以达到计算机应用的最佳综合效益；而产品数据管理系统则可将上述问题获得最优化的解决方案。

企业组织的分散化使分布式系统成为计算机系统的发展方向，分布式系统是以多种计算机资源、以一定互联方式组成的开放式、多平台、可交互的合作系统。产品数据管理的内涵是集成并管理与产品有关的信息和过程，在企业范围为设计与制造建立一个并行化产品开发的协作环境。它视企业为一体，并可跨越整个工程技术群体，在分布式企业管理模式的基础上与其他应用系统建立直接联系。它强调产品信息全局共享的观点，扩大了产品开发建模的含义，它为不同地点、不同部门的人员提供了一个协同工作的环境，共同在一数字化的产品模型上工作。

产品数据管理目前尚没有一个统一的定义，D. Burdick 的论述较为精辟，他给出的 PDM 定义如下：

1）PDM 是在企业内为设计与制造构筑一个并行化产品协作环境的关键使能器。

2）成熟的 PDM 系统能够使所有参与创建、交流、维护设计意图的人们在整个产品生命周期中共享与产品相关的所有异构数据，包括图纸与数据化文档、CAD 文件和产品结构等。目前，由于新的制造模式的发展与应用，如 CIMS、并行工程、虚拟制造、智能制造等对信息的要求愈来愈高，信息流已先于其他物流在企业内部流动。随着敏捷制造、动态联盟的发展，信息集成化管理时代的到来，大规模网络化信息分布交换与处理必将逐步实现。产品数据管理是企业计算机信息发展到一定阶段的必由之路。

作为 20 世纪末出现的新技术，PDM 继承并发展了 CIMS 等技术的核心思想，在系统工程的指导下，用整体化的观念对产品设计数据和设计过程进行描述，规范产品生命周期的过程管理，保持产品数据的一致性和连续性。PDM 的核心内容是设计数据有序化、设计过程优化和实现资源共享。PDM 技术成为企业过程重组（BPR）、并行工程、CIMS 工程和 ISO 9000 质量认证等系统实施的支撑技术。

近几年来，PDM 发展很快，据美国 CIMdata 公司调查，全球 PDM 软件和服务市场以年增长率 30％的速度增长，在他们调查的公司中有 48％的企业要实施 PDM。越来越多的企业认识到使用 PDM 来组织、存取和管理设计开发及制造数据的重要性，使用 PDM 技术可以缩短产品上市时间、降低产品制造成本、提高产品质量，为企业在市场竞争中产生巨大的效益。在机械、电子、航空等产业领域，PDM 正逐步得到广泛的应用。

2. 产品模型数据和管理标准

在 PDM 技术快速发展中，也伴随着出现了产品模型数据交换的多种标准或规范，如 IGES，VDAIS，VDAFS，SET 等。但是这些标准规范仅适用于计算机集成生产中的各子系统传递所形成的技术图或简单的几何模型，而更为详细的设计创造信息如公差标注、材料特性、零件明细表或工作计划等信息不能完整地传送。针对以上这些问题，于 20 世纪 90 年代初，国际标准化组织（ISO）颁布了产品模型数据交换和管理的标准 STEP。它是一套一系列的国际标准，其目的是在产品生存期内能为产品数据的表示与通信提供一种中性数字格式，这种数据格式能完整地表达产品信息。

产品数据的表达和描述采用 EXPRESS 语言，可对产品模型进行一致的、无歧义的和完整的描述。EXPRESS 是一种面向对象结构的特殊语言，在 STEP 中的集成资源和应用协议中均采用这种语言。

虽然资源模型定义非常完善，但还需经过应用协议在应用程序中的数据交换才能达到满意的结果，并须经过一致性测试。STEP 标准也相应制订了一致性的测试方法和框架等内容。

实践证明，STEP 标准在产品整个生命周期内为产品的数据表示与通信提供的这种格式能完整地、准确地表达产品信息。STEP 提供了先进的数据重复的问题，这就是数据管理技术能有效解决的问题。

3. 企业应用 PDM 的步骤

企业在应用 PDM 方面也需要有计划、有步骤地进行。投资 PDM 软件的实施应用，需要慎重行事。一般来说，企业应用 PDM 的基本步骤如下：

1）全面认识 PDM。在开展 PDM 系统应用的初期，企业需要对 PDM 系统进行详细的了解和学习，掌握 PDM 的原理和相关内容。除此以外，企业还需要了解与自己类似的国内

企业。在应用PDM系统方面的具体情况，以吸取他们的经验、教训。对PDM相关的知识了解得越详细且全面，以后的工作就越顺利。

2）确定企业的需求和目标。企业自身有哪些方面的问题需要解决，企业对PDM系统实施的期望和目标是什么应该明确。在这个阶段，企业必须要对PDM系统有一个科学的认识：PDM系统能够解决哪些问题，不能够解决哪些问题；哪些问题是需要从其他方面着手解决的，对这些问题需要进行充分的论证。企业需求和目标的制订，将直接影响企业的软件选型、实施以及应用。

3）软件选型。软件选型的重要性就不用多说了，选型的结果将直接决定着企业的投资以及实施成效等至关重要的问题。

4）PDM系统的实施。在选定了软件以后，企业就进入了PDM系统的实施阶段。实施又可以分为两个阶段：实施准备阶段和实施进行阶段。准备阶段需要做的工作将直接影响整个项目的实施进展，企业应该引起相当的重视。

5）系统运行维护。在实施后期，PDM系统就逐渐进入了正常运行阶段。PDM系统在企业的使用过程中并不是一成不变的，还需要不断地维护和完善，企业自身的很多问题和需求是在PDM系统的不断完善中解决的。企业需要培养自己的人才，结合企业自身的实际需求，对PDM系统进行维护和完善。在这个过程中，企业对于PDM系统的了解将逐步深入，对于PDM系统的运用也将逐渐得心应手。

习题

1. 何谓先进制造技术？它的核心、目的与特征是什么？
2. 简述制造技术的特点。
3. 简述先进制造工艺的定义与特征。
4. 简述特种加工的定义及电火花加工的原理。
5. 分析FMT工作原理及其组成。
6. 简述FMS的结构组成与特点。
7. 比较并行工程与串行工程的区别。
8. 分析精益生产的思维特点与体系结构。
9. 简述敏捷制造的定义与基本特点。
10. 什么是PDM，企业应用PDM的步骤是什么？

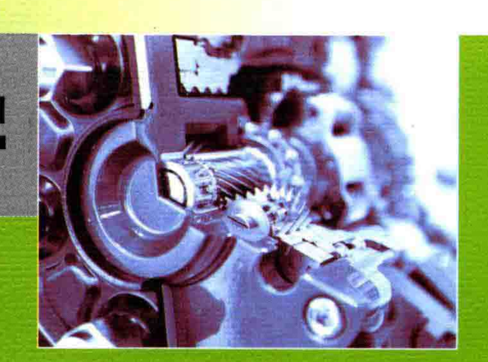
参考文献

[1] 王先逵. 机械制造工艺学 [M]. 3版. 北京：机械工业出版社，2013.
[2] 陈明. 机械制造工艺学 [M]. 北京：机械工业出版社，2013.
[3] 翟旭军，王文丽. 机械制造技术 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2009.
[4] 陈红霞. 机械制造工艺学 [M]. 北京：北京大学出版社，2010.
[5] 马敏莉. 机械制造工艺编制与实施 [M]. 北京：清华大学出版社，2011.
[6] 万苏文，何时剑. 典型零件工艺分析与加工 [M]. 北京：清华大学出版社，2010.
[7] 熊良山. 机械制造技术基础 [M]. 2版. 武汉：华中科技大学出版社，2012.
[8] 邓志平. 机械制造技术基础 [M]. 2版. 成都：西南交通大学出版社，2008.
[9] 王宜君，李爱花. 机械制造技术 [M]. 北京：清华大学出版社，2011.
[10] 张鹏，孙有亮. 机械制造技术基础 [M]. 北京：北京大学出版社，2009.
[11] 聂建武. 金属切削与机床 [M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2006.
[12] 陈旭东. 机床夹具设计 [M]. 北京：清华大学出版社，2010.
[13] 李菊丽，何绍华. 机械制造技术基础 [M]. 北京：北京大学出版社，2013.
[14] 王平嶂. 机械制造工艺与刀具 [M]. 北京：清华大学出版社，2005.
[15] 王世敬. 机械制造工艺学 [M]. 北京：石油工业出版社，2011.
[16] 金捷，刘晓菡. 机械制造技术与项目训练 [M]. 上海：复旦大学出版社，2010.
[17] 魏康民. 机械加工工艺方案设计与实施 [M]. 北京：机械工业出版社，2010.
[18] 吴雄彪. 机械制造技术课程设计 [M]. 杭州：浙江大学出版社，2005.
[19] 周建华，孙俊兰. 机械制造技术概论 [M]. 2版. 北京：机械工业出版社，2013.
[20] 任小中. 先进制造技术 [M]. 2版. 武汉：华中科技大学出版社，2013.
[21] 吴拓. 机械制造工艺与机床夹具课程设计指导 [M]. 2版. 北京：机械工业出版社，2014.
[22] 王栋. 机械制造工艺学课程设计指导书 [M]. 北京：机械工业出版社，2010.

责任编辑：何格夫
封面设计：唐韵设计

JIXIEZHIZAOGONGYIXUE

机械制造工艺学



- 工程力学
- 机械制图
- 材料力学
- 机械设计
- 机械原理
- 机械设计基础
- 机械制造基础
- 机械设计课程设计
- 液压与气压传动
- 工程训练
- Auto CAD2010（含习题）
- 电工与电子技术
- 机械制造工艺学
- 单片机原理及应用
- 数控加工技术



定价：39.50元